



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**LA INCORPORACIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA A TRAVÉS DE LUPINUS
PARA LA FERTILIDAD DEL SUELO**

PILAR LOURDES GUERRERO ORTIZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

La presente tesis titulada: **LA INCORPORACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DE LUPINUS PARA LA FERTILIDAD DEL SUELO**, realizada por la alumna: **PILAR LOURDES GUERRERO ORTIZ** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. VICENTE ESPINOSA HERNÁNDEZ


ASESOR


DR. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA.

ASESOR


DR. GERARDO SERGIO BENEDICTO VALDÉS

ASESOR


M.C. PRÓCORO DÍAZ VARGAS

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por ser mi principal guía, por darme la fuerza necesaria para salir adelante y lograr alcanzar esta meta. Doy Gracias a Dios, por el don de la vida, la salud y por permitirme obtener este logro, confío en que dará frutos que servirán para hacer de éste mundo un lugar mejor para todos.

A mis padres y hermanos que siempre han confiado en mí y me han apoyado incondicionalmente, gracias por la motivación y energía que me han dado, porque ustedes son el motor de mi vida, los amo.

Mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han intervenido en mi vida, en especial para aquellos que estuvieron más cerca de mí en ésta etapa, ya que estoy segura de que en algún momento han escuchado estoicamente quejas y lamentaciones, alegrías y satisfacciones, o entusiastas explicaciones o confusiones del lupinus, la materia orgánica y sus implicaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de maestría.

A mi Tutor, asesores y sinodal para la realización de esta Tesis, por sus aportaciones y comentarios a este proyecto que enmarca un escalón más en mis logros.

“Las ideas son como las estrellas, no llegarás a tocarlas con las manos, pero como el marinero en el desierto de las aguas, las eliges como guía y si las sigues alcanzarás tu destino”.

Carl Schurz

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por enseñarme a luchar hacia delante, por su gran corazón y capacidad de entrega, por enseñarme a ser responsable y por educarme. Papá, mamá, no tengo con que agradecerles todo lo vivido, por su entrega, lo bueno y lo malo, lo alegre y lo triste, lo claro y lo oscuro; son cosas que me han servido para valorar muchas otras más y que me ayudarán en el camino de la vida. Va para ustedes un gran aplauso, mi admiración y agradecimiento por todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanos: son grandes los recuerdos que tengo de lo que hemos vivido juntos, de todo lo que me han enseñado y lo que he aprendido de ustedes. Siempre han estado cerca cuando he caído y me han ayudado a levantarme, cuando he estado feliz también lo han compartido conmigo, gracias por ser como son; los quiero mucho, son los mejores hermanos que pude tener, que Dios los bendiga.

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.”

Mahatma Gandhi

LA INCORPORACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DE LUPINUS PARA LA FERTILIDAD DEL SUELO

Pilar Lourdes Guerrero Ortiz, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2012

RESUMEN

Con la finalidad de estudiar los mejoradores orgánicos de lupinus, se estableció una fase en laboratorio, en el cual se incubó durante 58 días en condiciones controladas de humedad y temperatura, se realizaron mezclas de suelo tipo franco arenoso en combinación con mejoradores orgánicos de *Lupinus montanus* Kunth en verde (Av), compost maduro (Cm) y vermicompost maduro (Vc). Los resultados obtenidos indicaron que Av presentó un mayor desprendimiento de CO₂, mientras que el Cm y el Vc presentaron menor acción de la biomasa microbiana, esto se puede atribuir a que los mejoradores orgánicos presentaban distintas etapas de descomposición.

En la fase campo, se estableció el experimento en San Pablo Ixayoc; en un primer tratamiento se incorporó 25.22 kg de lupinus (Av); el segundo tratamiento fue urea (Uq) con 80 kg N ha⁻¹ aplicado al inicio del macollamiento de la avena y finalmente el testigo (T), sin incorporar nada al cultivo. La incorporación de lupinus produjo modificaciones favorables en las propiedades físicas y químicas del suelo, manifestadas particularmente, en una disminución en los valores de DA, incrementos en la retención de humedad, aumento de MO, estado estructural del suelo mayor de 65.5% y por consiguiente mayor coeficiente de estructuración, un diámetro medio ponderado considerado como estable y un rendimiento mayor de 1.95 kg m⁻².

Los resultados demostraron la factibilidad de la utilización del lupinus, como sustituto de fertilizantes químicos nitrogenados y el incremento de la productividad del suelo y los rendimientos del cultivo de la avena.

Palabras clave: respiración, madurez, descomposición.

THE INCORPORATION OF ORGANIC MATTER MADE FROM LUPINUS TO THE FERTILITY OF THE SOIL

Pilar Lourdes Guerrero Ortiz, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2012

ABSTRACT

In order to study organic improvers, established a laboratory phase, which was incubated for 58 days under controlled humidity and temperature, mixtures realized sandy loam soil type in combination with organic improvers of *Lupinus montanus* Kunth in green (Av), mature compost (Cm) and mature vermicompost (Vc). The results showed that Av showed a higher release of CO₂, while the Cm and Vc had lower microbial biomass action, this can be attributed that organic improvers had different stages of decomposition.

In phase field, the experiment was established in San Pablo Ixayoc; in a first treatment was incorporated 25.22 kg of lupinus (Av), the second treatment was urea (Uq) with 80 kg N ha⁻¹ applied at the beginning of tillering oats and finally the control (T), without adding anything to the crop. The incorporation of lupinus produced favorable changes in physical and chemical properties in the soil, particularly manifested in a decrease in DA values, increased moisture retention, increased MO, greater structural condition of soil and consequently higher coefficient of structuring, an average diameter regarded as stable and a higher yield of 1.95 kg m⁻².

Keywords: *breathing, maturity, decomposition.*

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
1.2 Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Lupinus	4
2.2 Materia Orgánica	7
2.3 Mineralización del Carbono.....	9
2.4 Mejoradores Orgánicos.....	13
2.4.1 Importancia de los mejoradores orgánicos.....	13
2.4.2 Tipos de mejoradores orgánicos.....	13
2.4.2.1 Compost	13
2.4.2.2 Vermicompost.....	15
2.4.2.3 Abono verde	16
2.5 Literatura citada	18
3. CAPITULO I. EVOLUCIÓN DE CO₂	24
3.1 Materiales y Métodos	24

3.1.1 Ubicación del experimento.....	24
3.1.2 Material Vegetal.....	24
3.1.2.1 Lupinus	24
3.1.3 Prueba de fitotoxicidad	25
3.1.4 Evolución de CO ₂	25
3.1.5 Parámetros físicos y químicos.....	28
3.1.6 Diseño experimental	28
3.2 Resultados y Discusión.....	29
3.2.1 Prueba de fitotoxicidad	29
3.2.2 Evolución de bióxido de carbono (CO ₂).....	31
3.2.3 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N).....	36
3.2.4 Humedad gravimétrica del suelo (%)	37
3.2.5 pH.....	39
3.2.6 Conductividad Eléctrica (CE dS m ⁻¹)	40
3.2.7 Carbono Orgánico	41
3.2.8 Nitrógeno Total.....	43
3.3 Conclusiones	44
3.4 Literatura Citada.....	45
4. CAPITULO II. ENSAYO EN CAMPO	48
4.1 Materiales y métodos	48
4.1.1 Ubicación del experimento.....	48
4.1.2 Avena	48
4.1.3 Parámetros evaluados.....	48
4.1.3.1 Retención de humedad	49
4.1.3.2 Distribución de agregados en seco	49
4.1.3.3 Coeficiente de estructuración (E)	50

4.1.3.4 Estado estructural del suelo (EES).....	50
4.1.3.5 Diámetro Medio Ponderado (DMP)	51
4.2 Diseño experimental.....	51
4.3 Resultados y discusión	54
4.3.1 Densidad aparente (DA g cm ⁻³).....	54
4.3.2 Retención de humedad (%CC, %PMP, %HA).....	55
4.3.3 Nitrógeno (%)	58
4.3.4 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N).....	59
4.3.5 Carbono Orgánico (%).....	60
4.3.6 Distribución de agregados	60
4.3.6.1 Coeficiente de estructuración.....	62
4.3.6.2 Estado Estructural del suelo (EES)	63
4.3.6.3 Diámetro Medio Ponderado (DMP)	64
4.3.7 Rendimiento (kg m ⁻²).....	65
4.4 Conclusiones	67
4.5 Literatura citada	68
5. APÉNDICE	71

ÍNDICE DE CUADROS

1. Estimación del N extraído de un rendimiento de 2 000 kg ha ⁻¹ de grano de L. angustifolius en Chile.....	7
2. Condiciones favorables en el compost.....	14
3. Identificación de tratamientos.	29
4. Índice de Germinación (IG) de plántulas de jitomate en compost y vermicompost de lupinus.....	30
5. Parámetros medidos al inicio y al final de la incubación.	37
6. Contenidos de humedad.....	38
7. Parámetros evaluados.	49
8. Escala de apreciación cualitativa del estado estructural del suelo.	50
9. Rangos para interpretar la estabilidad estructural con relación al DMP.	51
10. Identificación de tratamientos	52
11. Porcentaje de humedad.....	56
12. Composición de agregados sometido a diferentes tratamientos (tamizado en seco). .	61
13. Evaluación del estado estructural del suelo en San Pablo Ixayoc con diferentes tratamientos.....	64
14. Rendimiento kg m ⁻²	65
15. Pruebas de TUKEY al inicio de incubación.....	71
16. Pruebas de TUKEY al final de incubación.....	72
17. Pruebas de TUKEY ensayo en campo.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Procesos de mineralización.	10
2. Lupinus Montanus Kunth.	24
3. Compost y Vermicompost.....	26
4. Descomposición de lupinus.....	27
5. Frascos de incubación para evaluar CO ₂ desprendido.	29
6. Porcentaje de germinación a los 15 días.	30
7. Desprendimiento de C-CO ₂ en diferentes materiales.	31
8. Dinámica del C-CO ₂ acumulado.....	33
9. Tasa absoluta de mineralización de mejoradores orgánicos.....	35
10. Evolución de mineralización de carbono.	35
11. Relación C:N.	37
12. Constantes de humedad.....	38
13. Curvas de retención de humedad.....	39
14. Medición de pH al inicio y al final de la incubación.	39
15. Diferencias de la Conductividad Eléctrica al inicio y al final de la incubación.	41
16. Contenido de Carbono Orgánico y de Materia Orgánica.	42
17. Porcentaje de Nitrógeno en los tratamientos.	43
18. Olla y Membrana de presión.....	49
19. Croquis experimental.	52
20. Preparación del terreno.	53
21. Densidad Aparente.....	54
22. Curva de retención de humedad inicial.....	57
23. Curva de retención de humedad final.....	57

24. Nitrógeno.....	58
25. Relación Carbono: Nitrógeno.....	59
26. Distribución de contenido de MO.	60
27. Porcentaje de agregados (tamizado en seco) de tamaño < 0.25 a > 6.36 mm.....	61
28. Estabilidad estructural del suelo y su relación con el coeficiente de estructuración.....	63
29. Efecto de fertilización en el DMP de agregados.	65
30. Ensayo en campo.	66

1. INTRODUCCIÓN

Antes de que aparecieran los fertilizantes químicos, la única manera de abastecer nutrimentos a las plantas y reponer aquellos extraídos del suelo por los cultivos, era mediante la utilización de abonos orgánicos (Trinidad, 2002).

Ante la denominada “revolución verde” hubo un auge en la productividad agrícola en todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo como México, lográndose aumentar el rendimiento de los cultivos. El auge estuvo sustentado en gran parte, por la aplicación de fertilizantes químicos y pesticidas (Costabeber, 1998).

Sin lugar a duda, los fertilizantes químicos han contribuido a aumentar la producción de alimentos, pero a elevados costos económicos y ecológicos. Este cambio del uso de abonos orgánicos por abonos químicos en la fertilización de cultivos está propiciando el deterioro en el contenido de materia orgánica (MO) y un desbalance nutrimental, que al transcurrir el tiempo propicia la pérdida de fertilidad y capacidad productiva.

La necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas viables y sostenibles. Esta situación ha motivado a regresar a las actividades de antaño con los mejoradores orgánicos pero con la ventaja de los estudios que se tienen hoy en día, buscar nuevos compuestos que representen alternativas en la protección de cultivos. Resulta de interés considerar la importancia que tiene mejorar diversas características físicas, químicas y biológicas del suelo, y en este sentido, los mejoradores juegan un papel fundamental. Con estos mejoradores, se aumenta la capacidad que posee el suelo de absorber los distintos elementos nutritivos.

La MO consiste de una mezcla de residuos de plantas integrada por los aportes aéreos y subterráneos generados por las raíces y animales en diferentes estados

de descomposición. El conocimiento de los contenidos de MO y las propiedades del *Lupinus montanus* Kunth es escaso en México; esta leguminosa posee muchas cualidades que están siendo desaprovechadas por los productores mexicanos. Por esta razón se utilizó *Lupinus montanus* Kunth para emplearlo como mejorador orgánico y fertilizar el cultivo, en forma de abono verde.

Por otra parte, donde la escasez de agua representa una limitante para los cultivos y afecta la producción; es necesaria la generación y aplicación de técnicas que permitan mantener la humedad disponible en los suelos por mayor tiempo en los suelos.

1.1 Objetivo General

Evaluar la incorporación de abonos orgánicos a base de lupinus como mejorador de propiedades físicas, químicas y de la fertilidad.

1.1.1 Objetivos específicos

- Comparar las propiedades físicas y químicas en mejoradores orgánicos elaborados con lupinus (compost, vermicompost y abono verde).
- Evaluar la evolución del CO₂ en mejoradores orgánicos elaborados con *Lupinus montanus* Kunth.
- Evaluar el efecto de la incorporación al suelo de lupinus como abono verde sobre la estructura, retención de humedad del suelo y el contenido de materia orgánica.
- Evaluar el rendimiento de avena con fertilización orgánica y fertilización mineral.

1.2 Hipótesis

- No hay diferencia en las propiedades químicas de compost, vermicompost y lupinus.
- La producción de CO₂ será mayor en el tratamiento con lupinus como abono verde que en el composteado.
- La aplicación de mejoradores orgánicos elaborados con lupinus mejoran la estructura, la capacidad de retención de humedad del suelo y el contenido de materia orgánica edáfica, mejorando la fertilidad del mismo.
- No hay diferencia en el rendimiento de avena con fertilización orgánica o fertilización mineral.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Lupinus

El lupinus, pertenece al orden de Fabales, a la familia Leguminosae. Puede ser anual o perenne, herbácea de tallo erecto, habitualmente mide entre 0.8-2.5 m de altura, dependiendo del genotipo y medio donde se cultive (Tapia y Fries, 2007). Es una planta de clima moderado; la planta adulta es resistente a heladas, pero la planta joven es susceptible a las mismas.

Las leguminosas se utilizan en los sistemas agrícolas como fuente de N para los cultivos, para mantener los niveles de N del suelo (Glasener *et al.*, 2002) y reducir las necesidades de energía mediante la adición de cantidades significativas de N al suelo (Entz *et al.*, 2002). Grant *et al.*, (2002) señalan que los sistemas de cultivo que incluyen leguminosas tienen el potencial para contribuir con N a los cultivos siguientes y moderar los niveles de NO₃ en el suelo.

El interés en lupinus blanco en el sureste de EE.UU. se ha incrementado ya que se puede utilizar en rotación con cultivos anuales de verano para mejorar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de cultivo (Wiatrak *et al.*, 2004).

El género *Lupinus* forma un grupo diverso de plantas; por su rica diversidad de especies; se pueden agrupar en especies originarias de Europa y Norte de África y especies de América.

Comprende alrededor de 280 especies anuales y perennes. La mayoría de las especies se encuentran en América, con dos principales centros de diversidad de especies: en el oeste de América del Norte (aproximadamente 100 especies) y los Andes (cerca de 85 especies). En contraste, sólo 13 especies se encuentran alrededor del Mediterráneo (Eastwood *et al.*, 2008).

Un número de especies han sido domesticadas. De particular importancia desde el punto de vista agrícola, el lupinus de hoja estrecha (*Lupinus angustifolius*). En los

sistemas de agricultura sostenible reduce la necesidad de fertilizantes nitrogenados y aumenta los rendimientos de los cereales. Se extienden prácticamente por toda la región templada y subtropical de la Tierra, prosperando de modo silvestre en suelos arenosos (Foley, 2008).

En México se han reportado 110 especies en altitudes que varían de 0 a 4 000 m. En el valle de México, 22 especies y dos variedades han sido identificadas (Alderete, 2008).

La producción mundial de lupinus ha disminuido de alrededor de 1 190 000 t en el 2000 a más de 340 000 t en 2008, especialmente en Australia. La especie principal es *angustifolius* L. (lupinus de hoja angosta) y más del 80% se cultiva en el oeste de este país.

El lupinus tiene diferente crecimiento en comparación a otras leguminosas, su germinación es epigeal, es decir, los cotiledones emergen de la tierra antes del desarrollo de las verdaderas hojas, y el crecimiento temprano de las semillas en la etapa de germinación es más lento que en las etapas vegetativas posteriores, su tasa máxima de crecimiento es durante la floración (Palacios *et al.*, 2004).

Sus semillas se utilizan como fuente de proteína para la nutrición animal y humana en distintas partes del mundo, no sólo por su valor nutricional, sino también por su adaptabilidad a suelos marginales y a los climas. El consumo humano de lupinus ha aumentado en los últimos años (Zlatica *et al.*, 2011).

Tanto *L. albus* como *L. angustifolius* tienen abundantes pelos radicales y ambos pueden liberar grandes cantidades de protones a la rizosfera, adaptaciones que probablemente contribuyen a una mejor absorción de nutrientes (Perry *et al.*, 1998; citado por Mera y Rouanet, 2003).

La descomposición de una raíz pivotante como la del lupinus crea espacios que propician la aireación y mayor retención de humedad en el suelo. Hay evidencia

de que la acción de la raíz pivotante del lupinus en suelos con horizontes compactados facilita la penetración de la raíz del cereal que le sigue (Mera y Rouanet, 2003).

Henderson (1989) observó que gracias a la profundidad que alcanzan las raíces del lupinus, el cultivo que le sigue tiene mejor acceso al agua almacenada en capas profundas. Esto le ha valido el apodo de “arado biológico”. Baer (1989), encontró que las raíces del lupinus blanco pueden profundizar hasta 2-3 m en un andisol de Chile. Sin embargo, en suelos pesados, como los ultisoles, se ha observado que la raíz de *Lupinus albus* es incapaz de penetrar la zona de suelo compactada conocida como “pie de arado”, situación que limita la capacidad del lupinus de captar nutrientes y frena drásticamente el desarrollo de su parte aérea (Mera *et al.*, 1999). También hay evidencia de que leguminosas cuyas raíces exudan ácidos orgánicos, como el lupinus, pueden acidificar el suelo a cierta profundidad (Mera y Rouanet, 2003).

Se estima que el lupinus puede obtener 70%, 80% y hasta 90% de su N vía fijación simbiótica. La cantidad promedio de N en la biomasa aérea de *L. angustifolius*, obtenida de 48 mediciones, fue 201 kg ha⁻¹, y en *L. albus* fue 333 kg ha⁻¹, como media de 21 mediciones (citado por Mera y Rouanet, 2003). De acuerdo a lo anterior, estas especies de lupinus habrían fijado alrededor de 150 y 250 kg ha⁻¹ de N, respectivamente (Cuadro 1).

En general, los datos indican que 50-80% del N de la biomasa de la leguminosa proviene de la fijación biológica (citado por Mera y Rouanet, 2003). Según Hamblin *et al.*, (1993), un cultivo de lupinus fija más N del que finalmente exporta en el grano. La mayoría del N remanente permanece en los residuos, y otra fracción del N fijado puede quedar en el pool de suelo. Hay escasas estimaciones de su magnitud, pero en ciertos estudios se han encontrado grandes cantidades de N mineral después de la cosecha de lupinus. El origen de este N no es claro; puede provenir de la fijación de N₂ o puede ser consecuencia de la menor utilización del

N mineral derivado del suelo por parte del lupinus (citado por Mera y Rouanet, 2003). Según Russell y Fillery (1996), alrededor de 27% del N que deja el lupinus se mineraliza anualmente, y 74% del N mineralizado es absorbido por cada cultivo subsiguiente de trigo (Mera y Rouanet, 2003).

Cuadro 1. Estimación del N extraído de un rendimiento de 2 000 kg ha⁻¹ de grano de L. angustifolius en Chile.

Fracción vegetal	<i>L. angustifolius</i> (kg ha ⁻¹)	
	Materia seca	N
Grano	2 000	93
Pared vainas	941	14
Tallo y hojas	3 726	54
Raíces	2 467	60
Total	9 134	221

Fuente: Mera y Rouanet, 2003

Russell y Fillery (1996) reportaron para un cultivo de lupinus maduro una cantidad total de 321 kg ha⁻¹ de N, de los cuales 91 kg ha⁻¹ de N, esto es, 28%, provinieron de la biomasa subterránea. Según estos autores, sugieren que la cantidad y la tasa neta de mineralización del N de la biomasa subterránea del lupinus son una fuente importante de N para el cereal cultivado subsiguientemente (Mera y Rouanet, 2003).

En New South Wales, Herridge (1982) reporta que en un suelo arcilloso, el cultivo de trigo recibió del cultivo de lupinus un aporte equivalente a 80 kg ha⁻¹ de N en un año húmedo para esta región (723 mm), pero sólo 40 kg ha⁻¹ de N en un año considerado seco (421 mm). Se ha reportado que el estrés por falta de humedad durante la floración del lupinus reduce la tasa de fijación de N₂ (Farrington *et al.*, 1977), lo mismo que el exceso de humedad (Mera y Rouanet, 2003).

2.2 Materia Orgánica

La materia orgánica (MO) definida por la totalidad de sustancias orgánicas presentes en el suelo que pueden proceder de residuos vegetales y animales en diferentes estados de transformación, tejidos de microorganismos, exudados

radicales, aportes orgánicos externos, biomasa del suelo y productos resultantes de su senescencia y metabolismo (Labrador, 2003). La MO es considerada como un componente vital para la salud del suelo ya que juega un rol importante en la fertilidad física, química y biológica del suelo.

Una vez que entra en contacto la MO con el suelo es susceptible de: a) que sea mineralizada completamente y se liberen compuestos inorgánicos, b) que sea asimilada por la biomasa microbiana, c) que sea humificada y se formen ácidos húmicos y fúlvicos o d) que sea absorbida a la fracción mineral del suelo (Tate, 1987; citado por Aviles, 2006).

La MO es una fracción activa e importante del suelo, químicamente es la fuente de casi todo el N, de 5% a 60% de P, hasta 80% de S y gran parte del B y Mo. La MO en los suelos agrícolas, participa en una red de ciclos, que asociada al componente vivo del suelo, tiene importancia en el movimiento de nutrientes, dado que en la composición de dicha materia se tienen reservas de nutrientes que son liberados en la mineralización (Noriega *et al.*, 2006).

La tasa de mineralización de los residuos orgánicos depositados o incorporados al suelo está relacionada directamente a su labilidad o resistencia que ofrecen contra la acción de la biomasa microbiana, el tiempo necesario para que sean mineralizados será función de la cantidad y calidad de los residuos (Galvis, 1998).

De acuerdo a Galvis (1998) las reservas orgánicas se dividen en activas (lábilas R_{OAL} y estabilizadas R_{OAE}) y pasivas R_{OP} que contribuyen a la fertilidad química y física, respectivamente. Las R_{OAL} están formadas por material orgánico de reciente depositación que contienen azúcares, aminoácidos, hemicelulosas, celulosas; que tardan en mineralizarse alrededor de un año. Las R_{OAE} están formadas por material no humificado que pueden estar protegidas en el interior de la matriz arcillosa, con un tiempo de mineralización de 1 a 5 años.

Existen observaciones contradictorias respecto al efecto de la MO en la acidificación del suelo. En muchos perfiles de suelos donde el suelo es ácido, las capas más acidificadas se encuentran por debajo de 10 cm (Dolling, 1995; Williams, 1980; citado por Tang y Yu, 1999), mientras que la MO se acumula en general en los primeros 10 cm del suelo (Williams, 1980; citado por Tang y Yu, 1999).

2.3 Mineralización del Carbono

La mineralización del C y la descomposición de residuos son características fundamentales del ciclo de nutrientes. El C orgánico de los residuos vegetales es la principal fuente de energía para el crecimiento celular y el metabolismo en el suelo (López y Álvarez, 2006).

El metabolismo del C depende de si los microorganismos requieren compuestos que contienen C para su crecimiento y como fuente de energía. Con presencia del C orgánico la población microbiana aumenta.

El metabolismo puede dar lugar a la mineralización. La señal más evidente de este proceso es la respiración en el suelo. El metabolismo puede dar lugar a la producción de compuestos biológicamente activos o inactivos y puede generar la incorporación de MO al suelo (López y Álvarez, 2006).

La descomposición de residuos vegetales es un proceso de origen biológico y se lleva a cabo por actividades metabólicas de los organismos del suelo. Esto está determinado por los organismos del suelo, el medio ambiente físico (temperatura, humedad, textura del suelo y los niveles de oxígeno) y la calidad de los residuos vegetales (C:N) (Tra, 2009).

El producto final de la descomposición incluyen CO₂, agua, energía, biomasa microbiana, nutrientes inorgánicos y resíntesis de compuestos de C orgánico como el humus, ácidos fenólicos, celulosa, hemicelulosa y lignina (Baldock, 2007;

citado por Tra, 2009). Compuestos simples como azúcares, aminoácidos y fenólicos de bajo peso molecular son descompuestos rápidamente, mientras que moléculas de polímeros como la celulosa, hemicelulosa y lignina son descompuestos lentamente (Berg y Mc Claugherty, 2003; citado por Tra, 2009).

Mayer *et al.*, (2004), mostraron que hubo diferencias significativas entre las especies de leguminosas en el aumento de la mineralización de C después de la adición de residuos de cosecha; la mayor cantidad de C mineralizado fue el de residuos de lupinus, seguida de habas y guisantes.

A medida que transcurre el tiempo, los materiales carbonados se van degradando; sin embargo, los materiales carbonados más simples son los que rompen en primer lugar y sirven de sustrato para los microorganismos, por lo que se incrementa la biomasa microbiana; en las etapas posteriores, los materiales son más complejos y los microorganismos son más específicos y menos abundantes y empieza a entrar en una etapa de estabilidad en cuanto el material de fácil degradación comienza a agotarse (Velasco *et al*, 2004).

Lo anterior concuerda con los procesos de mineralización (Figura 1).

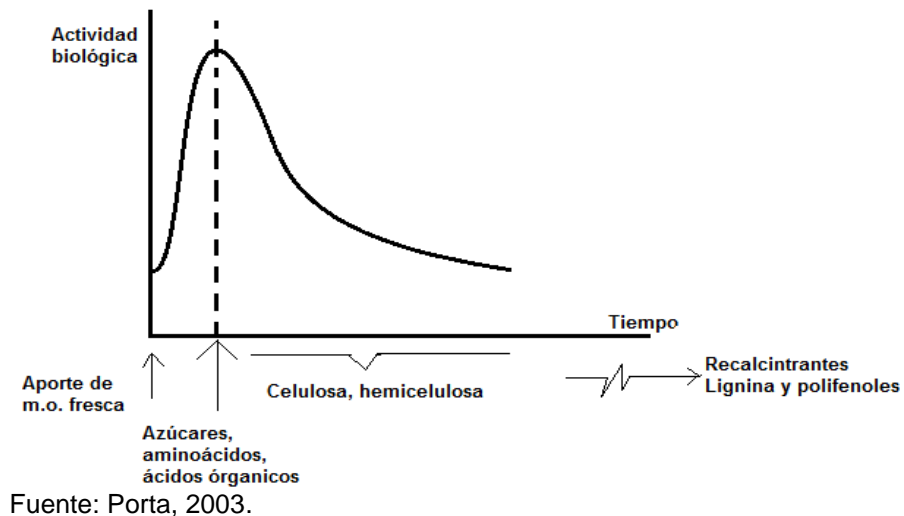


Figura 1. Procesos de mineralización.

La tendencia de descomposición no es estable durante el período de incubación, por mostrar oscilaciones durante el mismo. Esto evidencia el agotamiento del sustrato carbonado más lábil, los pequeños incrementos hacia el final de la incubación obedecen a la descomposición del material recalcitrante. Además, se debe considerar la dinámica del C unido a la biomasa microbiana misma: muerte de las células y reutilización del sustrato (García y Rivero, 2008).

Acosta *et al.*, (2006) realizaron incubaciones donde indican un decaimiento en los valores de C-CO₂ obtenido diariamente. Esta conducta en el material, pone de manifiesto, que en el proceso global de la mineralización de C se definen secuencialmente y alternativamente dos etapas fundamentales.

La primera etapa corresponde al incremento en la actividad biológica y a la degradación por parte de los microorganismos de sustancias fácilmente biodegradables, los cuales estimulan tanto el crecimiento como la respiración de un gran número de microorganismos, ya que son fuente de C y energía. Esta actividad se mantiene mientras existan compuestos fácilmente biodegradables. La segunda etapa, está descrita por la disminución en el desprendimiento de C-CO₂, la cual define también un decrecimiento en la actividad biológica, como consecuencia de la disminución de las sustancias fácilmente biodegradables, provocando así su estabilización al final del proceso.

La siembra, manejo de residuos, y la fertilización regulan las actividades microbianas, que a su vez median los procesos de MO, de rotación y ciclo de nutrientes (Biederbeck *et al.*, 1984; Doran y Smith, 1987; citado por Ajwa *et al.*, 1998).

La mineralización del C orgánico y la mineralización de N se llevan a cabo por una amplia variedad de microorganismos, realizados principalmente por bacterias heterótrofas. Cuando los residuos vegetales se descomponen, las poblaciones

microbianas aumentan rápidamente, evidenciado una mayor liberación de CO₂ (Tra, 2009).

La mineralización consta de tres etapas caracterizadas por tres reacciones esenciales: a) la aminización, b) la amonificación y c) la nitrificación. Las dos primeras reacciones la utilizan organismos heterótrofos cuya fuente de energía son compuestos carbonados orgánicos, y la tercera reacción es a causa de las bacterias autotróficas, que obtienen su energía de la oxidación de sales inorgánicas y el CO₂ de la atmósfera circundante (Guerrero, 1993).

Normalmente, los residuos de plantas como la familia de Poaceae como el trigo, avena y cebada tienen una alta relación C:N (cerca a 100) y la familia de las Fabaceae o leguminosas como soya, lupinus, veza, frijol tienen una baja relación C:N (9-10) (Tra, 2009) con lo cual se cumplen los requerimientos de N de la población microbiana del suelo y el N extra se mineraliza y convierte en forma disponible para la planta.

Partiendo de la generalización de que los residuos orgánicos incorporados al suelo contienen alrededor de 45% de C; 35% de ese C pasará a formar parte de la biomasa microbiana y finalmente que la relación C:N en dicha biomasa microbiana es de alrededor de 8/1, puede calcularse la cantidad de N que se liberará al incorporar en el suelo diferentes residuos orgánicos de concentración conocida de N (Núñez, 2011).

De acuerdo a Nikliska y Klimer (2007), la tasa de respiración de los residuos vegetales con una alta relación C:N es inferior a la de residuos de las plantas de baja relación C:N, ya que no contienen N suficiente para satisfacer las exigencias de los organismos del suelo. En la medida que los residuos contienen grandes cantidades de C, estos se descompondrán lentamente debido a la celulosa o lignina (Tra, 2009).

2.4 Mejoradores Orgánicos

2.4.1 Importancia de los mejoradores orgánicos

Un mejorador orgánico proviene de la degradación y mineralización de los residuos de origen animal y vegetal. De los mejoradores orgánicos, las plantas pueden obtener importantes cantidades de nutrimentos; el suelo, se ve enriquecido con C orgánico, favorece su fertilidad mejorando algunas de las propiedades y características, incrementa la actividad microbiana y facilita el transporte de nutrientes a la planta a través de las raíces (Trinidad, 2000).

En la agricultura mexicana, se observa que con aplicaciones de mejoradores orgánicos, principalmente estiércoles, se obtienen respuestas favorables en el rendimiento de las cosechas (Trinidad, 1987; citado por Cuervo, 2010).

Los mejoradores orgánicos son importantes por su contenido de MO. Todos los suelos requieren la aportación de ésta como portadora de energía degradable y nutrimentos para los microorganismos del suelo (Cuervo, 2010).

2.4.2 Tipos de mejoradores orgánicos

Entre los mejoradores orgánicos se incluyen los estiércoles, compost, vermicompost, abonos verdes, residuos de las cosechas, residuos orgánicos industriales, aguas negras y sedimentos orgánicos.

En el presente trabajo únicamente se abordarán el compost, vermicompost y abonos verdes.

2.4.2.1 Compost

El nombre correcto de acuerdo a la Real Academia Española es “compost” y significa “humus obtenido artificialmente por descomposición bioquímica en caliente de residuos orgánicos”. En México se utiliza el término “composta” que el diccionario sitúa como un sinónimo de “composición”, ya que proviene del latín

componere que significa juntar. El proceso por el cual se elabora compost se ha denominado “compostaje” (Rodríguez y Córdova, 2006).

La biodegradación es consecuencia de la actividad de los microorganismos que crecen y se reproducen en los materiales orgánicos en descomposición. La consecuencia final de estas actividades vitales es la transformación de los materiales orgánicos originales en otras formas químicas. Los productos finales de esta degradación dependerán de los tipos de metabolismo y de los grupos fisiológicos que hayan intervenido (Sztern y Pravia, 1999) (Cuadro 2).

El compostaje es un proceso aeróbico, biológico, termofílico de degradación y de estabilización de la MO bajo condiciones controladas. Durante el proceso, los sustratos más lábiles de la MO (azúcares, aminoácidos, lípidos y celulosa) son descompuestos, bajo condiciones controladas, en menor tiempo por bacterias, hongos y actinomicetos mesófilos tolerantes a temperaturas medias.

Posteriormente, se lleva a cabo la descomposición de materiales recalcitrantes por organismos termófilos (resistentes a altas temperaturas); las altas temperaturas causan la muerte efectiva de patógenos y semillas de malezas evitando que sean transferidos a cultivos sucesivos. La formación de ácidos húmicos es realizada principalmente por hongos y algunos actinomicetos (Soto y Muñoz, 2002).

El compostaje puede considerarse también como una eco tecnología, dado que se permite el retorno de la MO al suelo y la reinserción en los grandes ciclos ecológicos vitales de nuestro planeta (Ruíz, 2009).

Cuadro 2. Condiciones favorables en el compost.

Condición	Ámbito aceptable	Condición optima
Humedad	40 – 65%	50 – 60%
Oxigeno	+5%	8%
pH	5.5 – 9.0	6.5 – 8.0
Temperatura °C	55 – 75	65 – 70°C
Tamaño de partícula mm	0.5 – 1.0	65 – 70°C
Color	Marrón oscuro – negro ceniza	
Olor	Sin olor desagradable	

N° de termófilos	Decreciente a estable
Reducción de azúcares	35%
Nematodos	Ausentes

Fuente: Sztern y Pravia, 1999.

2.4.2.2 Vermicompost

Se denomina Humus de Lombriz (lombricompost) al producto resultante de la transformación digestiva y metabólica de la MO, mediante la crianza sistemática de lombrices de tierra, denominada Lombricultura (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2008).

Las lombrices, durante el proceso de alimentación, fragmentan los residuos, incrementan la actividad microbiana y los índices de descomposición y/o mineralización de los residuos orgánicos, alteran las propiedades físicas y químicas de los materiales, provocando un efecto de composteo o humificación mediante el cual la MO inestable es oxidada y estabilizada. El producto final, comúnmente llamado vermicompost es obtenido conforme los residuos orgánicos pasan a través del intestino de la lombriz, y es bastante diferente al material original. Se ha demostrado que bajo la acción de las lombrices se incrementa tanto la velocidad de mineralización del N como los índices de conversión del N-NH_4^+ a N-NO_3^- (Atiyeh *et al.*, 2000; citado por Moreno, 2006).

Las lombrices de tierra son consumidores de residuos orgánicos, aun cuando sólo utilizan una pequeña porción para la síntesis de sus cuerpos, excretan una gran parte de los residuos consumidos en una forma digerida. Puesto que los intestinos de las lombrices contienen una amplia gama de microorganismos, enzimas, hormonas, etc., éstos materiales se descomponen rápidamente y son transformados a una forma de vermicompost en un período de tiempo corto (Ghosh *et al.*, 1999; citado por Moreno, 2006).

Las sustancias que se encuentran en la excreción son principalmente H_2O , NH_4 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$, Cl, Na y K (Edwards y Lofty, 1977; citado por García, 2006).

Mackay y Kladvko (1985) encontraron que leguminosas como soya o trébol aumentan notablemente la población de lombrices, organismos de conocida eficiencia en la descomposición de residuos. Los mismos autores determinaron que una mayor presencia de lombrices está asociada a un aumento de agregados estables al agua en la superficie del suelo. La mayor agregación del suelo mejora la absorción de agua y aumenta la resistencia del suelo al arrastre, reduciendo el proceso erosivo (Mera y Rouanet, 2003).

2.4.2.3 Abono verde

Un abono verde es un tipo de cultivo de cobertura agregado primariamente para incorporar nutrientes y MO al suelo. Los abonos verdes y cultivos de cobertura son la piedra angular de una agricultura sostenible. En el sistema de siembra directa, los abonos verdes son incorporados biológicamente y no mediante implementos de preparación del suelo (Mera y Rouanet, 2001).

La adición de material orgánico de fácil descomposición acelera la mineralización de MO más resistente. Por lo tanto, las adiciones de abonos verdes de fácil descomposición, son útiles por su liberación de N y otros nutrimentos en el suelo. Cuando se incorporan en el suelo leguminosas para abono verde, se ha demostrado que mejoran la MO del suelo, la retención de humedad y la viabilidad del suelo (Fischler, 1996; citado por Wabwile *et al.*, 2010).

Los cultivos de cobertura no son una tecnología nueva. Los griegos y los romanos han practicado la rotación de cultivos y el lupinus (*L. albus*) y arveja (*Vicia sativa*) como abonos verdes y para la supresión de malezas (Karlen *et al.*, 1994; citado por Pound, 2007).

El principal beneficio obtenido de los abonos verdes es la adición de MO al suelo. Durante la descomposición de MO por microorganismos, se forman compuestos que son resistentes a la descomposición, tales como gomas, ceras y resinas (Sullivan, 2003).

El aporte de MO al suelo de un cultivo de abono verde es comparable a la adición de 9 a 13 t ha⁻¹ de estiércol de granja o de 1.8 a 2.2 t de materia seca ha⁻¹ (Schmid y Klay, 1984; citado por Sullivan, 2003).

People *et al.*, (2001) encontraron que la cantidad de N fijado en el suelo después de una leguminosa de grano como el lupinus era suficiente para atender a por lo menos un posterior cultivo no leguminoso (Kapal, 2008).

En Bolivia, al incorporar el lupinus al cultivo de papa a una profundidad no mayor a los 20 cm, se tuvo un mayor rendimiento de la papa y una disminución de la infección de nematodos a través de los alcaloides que tiene el lupinus (Sarabia, 2004).

La inclusión de abono verde de lupinus aumentó significativamente el N disponible para las plantas, y el rendimiento de la materia seca de avena (Kapal, 2008).

2.5 Literatura citada

Acosta Y., J. Cayama, E. Gómez, N. Reyes, D. Rojas, H. García. 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencia*. 6:220-227.

Ajwa, H. A., C. W. Rice, y D. Sotomayor. 1998. Carbon and Nitrogen Mineralization in Tallgrass Prairie and Agricultural Soil Profiles. *Soil Sci. Am. J.* 62:942-951.

Alderete C. Á. 2008. Distribución altitudinal, tratamientos pre germinativos e influencia de *Lupinus spp.* (FABACEAE: PAPILINOIDEAE) en la fertilidad de suelos forestales. Tesis Doctoral. Colegios de Postgraduados. Campus Montecillo.

Aviles, M. S. M. 2006. Mineralización de las reservas orgánicas y su variación por efecto del suelo. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo.

Costabeber, J. A. 1998. Acción Colectiva y Procesos de Transición Agroecológica en Rio Grande do Sul, Brasil. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

Cuervo, O. V. 2010. Abonos orgánicos como insumos de nutrición vegetal en un sistema hidropónico alternativo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo.

Eastwood R. J., C. S. Drummond, M. T. Schifino-Wittmann y C. E. Hughes. 2008. Diversity and evolutionary history of Lupins insights from New Phylogenies. p. 346-354. *In*: J.A. Palta y J.B. Berger (Eds.). *Lupins for Health and Wealth*. Proceedings of the 12th International Lupin Conference. International Lupin Association, Canterbury, New Zealand.

Entz M. H., V. S. Baron, P. M. Carr, D. W. Meyer, S. R. Smith, Jr., y W. P. McCaughey. 2002. Potential of Forages to Diversify Cropping Systems in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 94:240–250.

Foley R., L. L. Gao, J. Lichtenzveig, E. Smith, B. Shi, C. Atkins, B. Rosen, G. N. Carrasquilla, D. A. Farmer, V. Penmetsa, D. Cook. y K. Singh. 2008. How can the genomic revolution help improve lupins. p. 231-235. *In: J.A. Palta y J.B. Berger (Eds). Lupins for Health and Wealth. Proceedings of the 12th International Lupin Conference. International Lupin Association, Canterbury, New Zealand.*

Galvis S. A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo.

García A. y C. Rivero. 2008. Evaluación del carbono microbiano y la respiración basal en respuesta a la aplicación de lodo papelerero en dos suelos de la Cuenca del Lago de Valencia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 34: 215-229.

García P. R. 2006. La lombriz de tierra como una biotecnología en agricultura. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Glasener K. M., M. G. Waggoner, C. T. MacKown, y R. J. Volk. 2002. Contributions of Shoot and Root Nitrogen-15 Labeled Legume Nitrogen Sources to a Sequence of Three Cereal Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:523–530.

Guerrero P. A. 1993. Mineralización de Nitrógeno Orgánico en diferentes agro sistemas del Trópico Húmedo. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana.

Kapal D. B. 2008. Influence of a legume green manure crop on barley straw/stubble decomposition, and soil nitrogen retention and availability. Thesis for the Degree of Master of Applied Science at Lincoln University.

Labrador J. 2003. La material orgánica, base de la fertilización en agricultura ecológica. p. 110. *In:* Jorge de las Heras, Concepción Fabeiro, Ramón Meco.

López L. y S. Álvarez. 2006. El ciclo del carbono: la mineralización y la descomposición de residuos. Seminario no. 7. Universidad Nacional del Comahue.

Mayer Jochen, Buegger Franz, Steen Jensen Erik, Schloter Michael, Heß Jürgen. 2004. Turnover of grain legume N rhizodeposits and effect of rhizodeposition on the turnover of crop residues. *Biol. Fertil Soils*. 39:153–164.

Mera K. M., M. J. Rouanet, B. A. Montenegro, N. I. Pino. 1999. Importancia de contar con una leguminosa en la rotación. Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias 3:13-22.

Mera M. y Rouanet J. 2001. Lupino amargo, una alternativa para abono verde. Confederación Nacional de Federaciones de Cooperativas y Asociaciones silvoagropecuarias. Material técnico de desarrollo productivo.

Mera M. y Rouanet J. 2003. Contribución de las leguminosas de grano en rotación con cereales: una revisión. p. 135-156. *In:* E. Acevedo (Ed) Sustentabilidad de cultivos anuales: Cero labranza y manejo de rastrojos. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago. Serie Ciencias Agronómicas N°8.

Moreno R. A. 2006. Origen, importancia y aplicación de vermicomposta para el desarrollo de especies hortícolas y ornamentales.

Noriega A. G., H. S. Cruz y J. V. Bello. 2006. Abonos orgánicos para la Agricultura Sustentable en México.

Núñez E. R. 2011. Apuntes de Fertilidad de Suelos. Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados.

Palacios V. A., M. D. Salazar, C. L. Espinoza, M. M. Herrera, C. C. Huamancaja. 2004. Obtención de alcohol a partir de la malta de *lupinus mutabilis* (tarwi). Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería Química. Centro de Investigación.

Pound B. 2007. Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América. Natural Resources Institute.

Real Academia Española. Consulta del 19 de Marzo 2012, de <http://www.rae.es/rae.html>

Rodríguez S. M. y A. Córdova. 2006. Manual de Compostaje Municipal. 1º edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Instituto Nacional de Ecología (INE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. México. Pp 104.

Ruíz F. J. 2009. Ingeniería del compostaje. Universidad Autónoma Chapingo.

Sarabia M. 2004. Control Biológico del nematodo de la papa en el marco de una agricultura conservacionista. Programa Manejo Integral de Cuencas. Bolivia.

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. 2008. NMX-FF-109-SCFI-2008. Humus de lombriz (lombricomposta). Especificaciones y métodos de prueba.

Soto G. y Muñoz C. 2002. Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en la agricultura orgánica. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. 65:123-129.

Sullivan P. 2003. Overview of cover crops and green manures. *In*: P. Williams. NCAT Agriculture Specialist.

Sztern D., A. Pravia M. 1999. Manual para la elaboración de compost: bases conceptuales y procedimientos. Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Unidad de Desarrollo Municipal. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial De La Salud.

Tang C. y Yu Q. 1999. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. Centre for Legumes in Mediterranean Agriculture. Plant and Soil 215: 29–38.

Tapia M. y A. Fries. 2007. Guía de campo de los cultivos andinos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú.

Tra Thi Thang Duong. 2009. Dynamics of plant residue decomposition and nutrient release. Thesis for the Degree of Master of Agricultural Science. University of Adelaide, Australia.

Trinidad S. A. 2002. Secretara de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaria de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Sistema de Agro negocios Agrícolas. Abonos orgánicos. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.

Velasco V., J.; B. Figueroa; R. Ferrera, A. Trinidad, A.; Gallegos, J. 2004. CO₂ y dinámica de poblaciones microbianas en composta de estiércol y paja con aireación. *TERRA Latinoamericana*. 22(3). Pp. 307-316.

Wabwile K. W., M. S. Mutuku, O. R. Kariuki y N. J. Gitahu. 2010. Effect of incorporation of legumes on selected soil chemical properties and weed growth in a potato cropping system at Timboroa, Kenya. *African Journal of Agricultural Research* 5:2392-2398.

Wiatrak, P. J., D. L. Wright, y J. J. Marois. 2004. Legumes. Influence of Residual Nitrogen and Tillage on White Lupin. *Agron. Journal*. 96:1765–1770.

Zlatica K., K. Jolana y S. Štefan. 2011. Lupin Composition and Possible Use in Bakery. *Food Sci. Institute of Biochemical and Food Technology* 29:203–211.

3. CAPITULO I. EVOLUCIÓN DE CO₂

3.1 Materiales y Métodos

3.1.1 Ubicación del experimento

La presente investigación se llevó a cabo en el Municipio de Texcoco, Estado de México, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (19° 28' 05" latitud norte y 98° 54' 09" latitud oeste a una altitud de 2 220 m).

3.1.2 Material Vegetal

3.1.2.1 *Lupinus*

Se utilizaron plantas de *Lupinus montanus* Kunth identificadas por J. A. López-Sandoval en el Herbario-Hortorio del Colegio de Postgraduados, Montecillo, México (Figura 2); el lupinus fue traído de la montaña denominada Tláloc, que se localiza en la Sierra Nevada, municipio de Texcoco, Estado de México a 19°26'10" norte, 98°45'49" oeste. La planta de lupinus se encuentra en la ladera oriental de la Sierra Nevada, México, junto con áreas de bosque incendiadas, pastizales y tierras agrícolas.



Figura 2. *Lupinus Montanus* Kunth.

3.1.3 Prueba de fitotoxicidad

Para evaluar la madurez del compost y vermicompost se utilizó la prueba de fitotoxicidad por el método de determinación del índice de germinación propuesto por Zucconi *et al.*, (1985), empleando semillas de jitomate (*Lycopersicum esculentum*).

En las cajas de Petri se depositó una pasta constituida por una relación 1:2 (10 g de compost y 20 g de agua). Sobre ella se colocó un papel filtro. Posteriormente se depositaron 25 semillas con cuatro repeticiones y se evaluó la germinación de semillas y supervivencia de plántulas.

Se midió la longitud radicular de las plantas a los 15 días de su permanencia en los dos sustratos.

Del porcentaje de germinación y de la longitud radical se obtuvo el índice de germinación (IG) propuesto por Zucconi *et al.*, (1985), como parámetro que indica el grado de madurez de los residuos orgánicos mediante la siguiente fórmula:

$$IG = \% \text{ germinación} * \left(\frac{\text{longitud radicular de la plántula crecida en sustrato}}{\text{longitud radicular de la plántula testigo}} \right)$$

3.1.4 Evolución de CO₂

Para esta fase se realizó una incubación utilizando suelo de textura franco-arenoso en combinación con compost de *Lupinus montanus* Kunth (Cm) en relación 50% (p/p), vermicompost de la misma especie de lupinus (Vm) relación 50% (p/p), y lupinus verde (Av) en relación 50% (p/p) (Figura 3).



Figura 3. Compost y Vermicompost.

Se usó el método de incubación en medio cerrado con 5 mL de NaOH 1 N descrito por Anderson (1982). El CO₂ desarrollado por la descomposición de los residuos vegetales fue absorbido por el NaOH con formación de Na₂CO₃. El NaOH no combinado se trató con HCl 0.1 N después de la adición de 2 mL de BaCl₂ al 2% para precipitar los carbonatos y tres gotas de fenoftaleína como indicador.

De la diferencia entre la cantidad de NaOH presente inicialmente y la remanente después de la exposición al CO₂ se obtiene la cantidad de gas producido por respiración mediante la siguiente fórmula:

$$\text{mg CO}_2 = (B - M) * N * 22$$

Donde:

mg CO₂ es la respiración microbiana

B = mL de HCl empleados en la titulación del blanco

M = mL de HCl empleados en la titulación de la muestra

N = Normalidad del HCl

22 = Es el peso equivalente del CO₂

La variable evaluada en el experimento fue la respiración microbiana estimada como un método indirecto para medir la actividad de la microbiota de los sustratos. Para esto se evaluó el CO₂ después de 58 días de incubación (Figura 4). Todos los sustratos fueron humedecidos al 70% del valor de humedad, la reposición de humedad se hizo con base a la pérdida de peso y se mantuvieron en ese rango

durante todo el desarrollo del experimento. La incubación se realizó a temperatura ambiente.

Se consideraron tres blancos, los cuales se mantuvieron en las mismas condiciones. A los primeros 30 días del experimento las mediciones de CO₂ se realizaron diariamente, al día 31 se suspendieron retomándolas hasta el día 37 y hasta el día 58 se tomaron dos veces por semana.

Para determinar la acumulación de CO₂ se sumaron los mg de CO₂ que la unidad experimental producía en un día con los mg de CO₂ producidos subsecuentemente.



Figura 4. Descomposición de lupinus.

La tasa de mineralización del C orgánico fue calculada en base a los porcentajes que representan las cantidades acumuladas de C orgánico desprendido como CO₂, respecto al contenido inicial de C orgánico de las muestras en estudio (Arochas y Medina, 2006).

$$Tm = \sum_{i=0 \text{ día}}^{i=58 \text{ día}} \frac{C(CO_2)}{C_{org}} * 100$$

Donde:

T_m = tasa de mineralización, expresada en porcentaje.

C(CO₂)= Carbono desprendido como CO₂ expresado en g g⁻¹ mezcla.

C org. = Carbono orgánico presente al inicio del experimento, expresado en g 100 g⁻¹ de sustrato.

La tasa absoluta de mineralización (TAM) (Evans, 1972), representa la ganancia en peso por unidad de superficie de suelo y de tiempo y se determinó mediante la siguiente formula:

$$TAM = (P_2 - P_1) / (t_2 - t_1)$$

Donde: P= Peso

t₂-t₁= es el intervalo de tiempo entre el muestreo final e inicial, respectivamente.

P₂-P₁ = es la mineralización medida por dos días consecutivamente.

3.1.5 Parámetros físicos y químicos

Al inicio y al final de la incubación se determinó: pH (extracto acuoso relación 1:2) (Ansorena, 1994); conductividad eléctrica (extracto 1:5) mediante conductivímetro (Ansorena, 1994); constantes de humedad (capacidad de campo, CC y punto de marchitez permanente, PMP), mediante la olla y membrana de presión (Richards, 1947), respectivamente; contenidos de MO (Walkley y Black, 1934); C-orgánico con base en los resultados de la MO, mediante el factor de Van Bemmelen = 1.724; y N por el método de Kjeldahl (1883).

3.1.6 Diseño experimental

El experimento se estableció en laboratorio y se utilizó un diseño experimental completamente aleatorio (Figura 5). Los tres mejoradores orgánicos que se evaluaron conformaron los tratamientos más un blanco, con diez repeticiones;

teniendo un total de 40 unidades experimentales, situados en frascos de plásticos de 500 mL (Cuadro 3). Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System). Se realizaron análisis de varianza, comparación de medias de tratamientos, con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 3. Identificación de tratamientos.

Tratamiento	Nombre	Clave
1	Compost	Cm
2	Vermicompost	Vm
3	lupinus verde	Av



Figura 5. Frascos de incubación para evaluar CO₂ desprendido.

3.2 Resultados y Discusión

3.2.1 Prueba de fitotoxicidad

La prueba de germinación inició desde los cinco hasta los diez días, teniendo a los 15 días un porcentaje de germinación de 85% y 90% en compost y vermicompost, respectivamente. Después de 12 días de permanecer las plántulas en los sustratos, se encontró un mayor porcentaje de germinación con vermicompost. El compost indujo un menor porcentaje de germinación (85.5%) (Figura 6).

Los cambios en la prueba se pueden atribuir a que los vermicompost contienen sustancias biológicamente activas tales como reguladores de crecimiento vegetal,

que estimulan el crecimiento de las plantas e impiden la proliferación de organismos patógenos (Atiyeh *et al.*, 2000). El compost y vermicompost rara vez se utilizan al 100% como sustrato en la producción, ya que generan problemas en el desarrollo de la plántula.

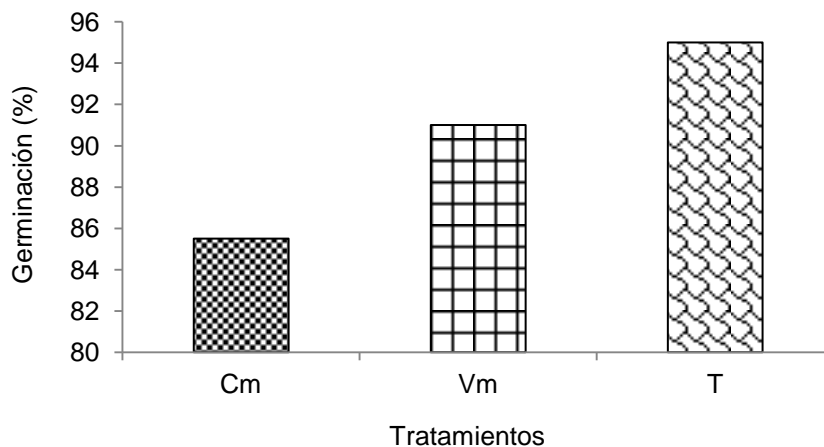


Figura 6. Porcentaje de germinación a los 15 días.
Cm=Compost, Vm= Vermicompost, T=Testigo.

La longitud radicular fue mayor en el testigo con 17.5 cm, seguido por el vermicompost (16 cm) y al final el compost (11.5 cm). El testigo estuvo representado por las plántulas desarrolladas sobre papel filtro sin adición de material orgánico. Para obtener el IG, la germinación del testigo se tomó como base (100%). El compost se considera maduro cuando alcanza un IG > 50 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Índice de Germinación (IG) de plántulas de jitomate en compost y vermicompost de *lupinus*.

Tratamientos	IG	Desviación estándar
Cm	56.9525	± 12.81
Vm	83.2004	± 4.73
T	95	±1.63

Cm= Compost, Vm=Vermicompost, T=Testigo.

Ambos sustratos se consideran maduros, ya que ambos alcanzan un IG > 50.

3.2.2 Evolución de bióxido de carbono (CO₂)

En los primeros cinco días de la incubación se observan mayores variaciones, producto de los microorganismos ante la presencia de un material reciente y rico en sustancias fácilmente degradables como proteínas y azúcares que varían con el tipo de material (Lerch *et al.*, 1992). El Av, Vm y Cm tuvieron un máximo de 649.44, 474.61 y 381.99 mg de CO₂ g⁻¹, respectivamente (Figura 7).

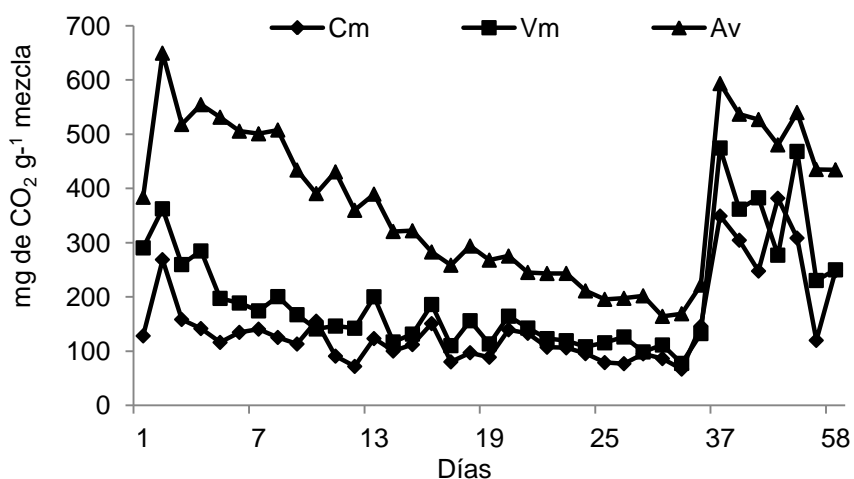


Figura 7. Desprendimiento de C-CO₂ en diferentes materiales. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

La cantidad de C-CO₂ desprendido por la actividad biológica de las mezclas incubadas durante 58 días provocó un incremento de la respiración en el tratamiento Av respecto al Cm y Vm y fue estadísticamente superior ($\alpha=0.05$); en este sentido, existieron diferencias estadísticas entre ellos.

El tratamiento más fresco, que no tuvo ningún proceso de descomposición anterior a la incubación, fue el Av, el cual desprendió mayor cantidad de CO₂ (649.44 mg de CO₂ g⁻¹), esto coincide con los resultados obtenidos por Contreras *et al.*, (2006) que incubaron diferentes materiales y obtuvieron que la gallinaza y el estiércol de caprino muestran una mejor repuesta inicial, en lo que a la activación de los

microorganismos del suelo se refiere, mientras el vermicompost presenta un comportamiento similar al del control.

En el día 37 existió un repunte en todos los tratamientos, siendo el mayor el tratamiento Av aumentando 371.5 mg de CO₂ g⁻¹, seguido por el aumento de Vm con 342.02 mg de CO₂ g⁻¹, y finalmente el Cm con 202.98 mg de CO₂ g⁻¹; esto debido a que al reponer la humedad perdida se reactivó la actividad microbiana, y por lo tanto la producción de CO₂ (Figura 7). Jamieson *et al.*, (1999) mencionan que la disponibilidad de agua es la principal restricción de crecimiento vegetal y procesos microbianos de mineralización.

Del día 1 al día 37, el ensayo se mantuvo con un contenido de agua óptimo; sin embargo, se vio sometido a unas sucesivas alternancias de humedecimiento y secado. Estas alternancias permitieron una renovación de aire del suelo, con lo que se favoreció el suministro de oxígeno, que a su vez, impulsó el proceso de descomposición.

Los incrementos registrados se concentraron básicamente en los primeros 10 días posteriores a la incorporación; esto se vincula a la degradación inmediata de las fracciones orgánicas lábiles presentes en el material añadido, con la consecuente producción de energía para el crecimiento de los microorganismos (Rivero y Hernández, 2001).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Stott *et al.*, (1986) quienes indicaron que las diferencias significativas en la descomposición de residuos, sólo son detectables como máximo hasta treinta días posteriores a la incorporación de los materiales orgánicos (Rivero y Hernández, 2001).

En la Figura 8 se presenta el volumen total de CO₂ producido durante 58 días en el proceso de incubación notándose, que durante los primeros 20 días de incubación, el proceso de emisión de CO₂ fue bastante intenso, aumentando más en los primeros 20 días (2 538.95 mg de CO₂ g⁻¹ en Cm, 3 735.87 mg de CO₂ g⁻¹

Vm y 8 177.71 mg de CO₂ g⁻¹ en Av) comparado con el volumen total de CO₂ producido del día 20 al 58 (1 178.30, 1 557.95 y 3 005.28 mg de CO₂ g⁻¹ en Cm, Vm y Av, respectivamente).

Este incremento se puede atribuir al contenido de C orgánico presente en los materiales de partida, los cuales suministraron el sustrato necesario para la proliferación de los microorganismos responsables de la descomposición. La actividad de los microorganismos que intervienen al inicio del proceso es máxima, como consecuencia de tener a su alcance gran cantidad de compuestos fácilmente biodegradables procedentes de los materiales orgánicos de partida (Acosta *et al*, 2006).

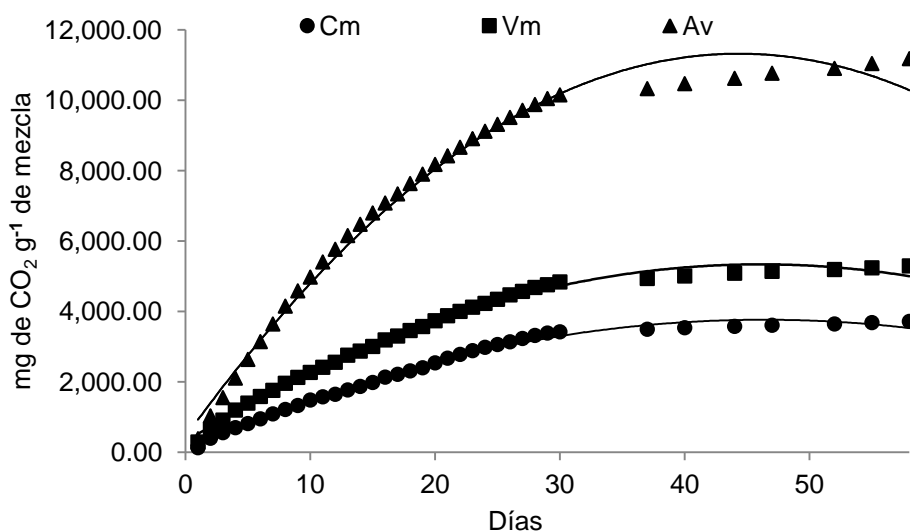


Figura 8. Dinámica del C-CO₂ acumulado.
Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

Para este parámetro se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre los diferentes tratamientos. La cantidad de C-CO₂ acumulado (Figura 8), muestra como la aplicación del residuo provocó un incremento de la respiración entre los distintos tratamientos alcanzando valores de CO₂ acumulado de 11 182.99, 5 293.82 y 3 717.24 mg de CO₂ g⁻¹ de mezcla en Av, Vm y Cm, respectivamente.

Ayuso *et al.*, (1996), reiteran que mientras más estable es la MO, la emisión de CO₂ y la actividad microbiana son menores. El desprendimiento de CO₂ en las muestras composteadas tuvieron hasta 5 889.17 mg de CO₂ g⁻¹ de mezcla en Vm y 7 465.75 mg de CO₂ g⁻¹ de mezcla en Cm menos que Av.

A pesar que los tratamientos Cm y Vm tuvieron un incremento en la evolución del CO₂, estos fueron menores para el tratamiento Av (Figura 9). Tal comportamiento podría explicarse por una menor cantidad de C disponible para los microorganismos debido al mayor grado de estabilidad que alcanzó el lupinus al ser composteado y vermicomposteado contra el lupinus fresco sin compostear.

Al inicio de la incubación se presentó la mayor tasa de mineralización dentro de los 58 días con 649.44 mg día⁻¹ en el tratamiento Av, 362.56 mg día⁻¹ en Vm y 268.84 mg día⁻¹ en Cm.

Al final de la incubación el tratamiento que mostró la mayor tasa absoluta de mineralización con 138.62 mg C día⁻¹ fue Av y 54.77 mg C día⁻¹ para Vm, seguidas del Cm con valores de 34.23 mg C día⁻¹.

El tratamiento Av tuvo una tasa absoluta de mineralización final de 10 799.15 mg C a los 58 días, 5 003.30 mg C para Vm y 3 588.98 mg C para Cm. Es decir, el tratamiento con mayor pérdida de C fue el Av que tuvo un 53.67% de aumento en comparación con el Vm y 66.8% con Cm.

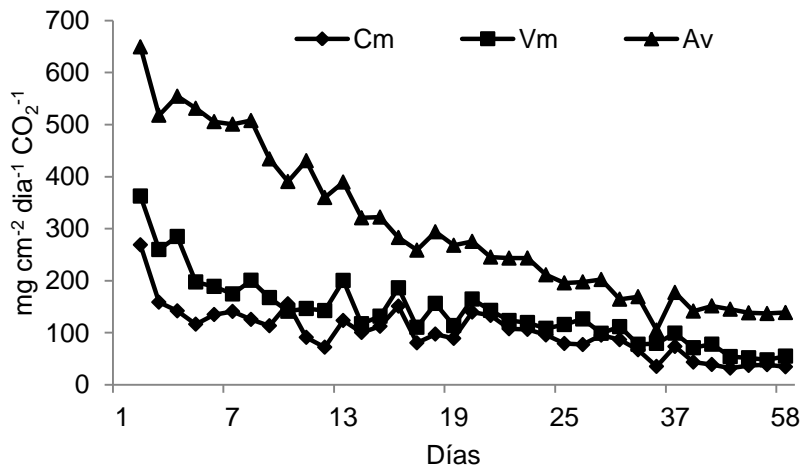


Figura 9. Tasa absoluta de mineralización de mejoradores orgánicos. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

La mayor tasa de mineralización del C se presentó en Vm con un porcentaje de C mineralizado de 24.47% al final de los 58 días, el tratamiento con menor porcentaje de mineralización fue el Av con 15.32% (Figura 10).

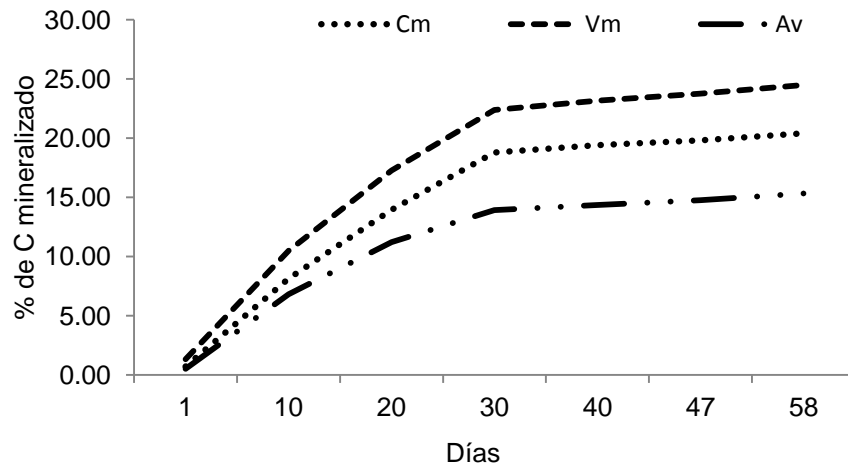


Figura 10. Evolución de mineralización de carbono. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

Durante los primeros 10 días, fue donde hubo un cambio notorio del C orgánico mineralizado. A partir del día 1 al 10 se mineralizó 10.48% en Vm, 8.14% en Cm y 6.82% en Av.

Los resultados revelan que después de 58 días de incubación, el nivel de C orgánico remanente en los tratamientos con respecto al contenido inicial, se traduce en pérdidas de fracciones orgánicas debido a las tasas de velocidad de C mineralizado, por orden de mayor a menor: Vm, Cm y Av.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Arochas y Medina (2006) los cuales revelan que el nivel de C orgánico remanente en los relaves acondicionados con sustratos orgánicos con respecto al contenido inicial, fue menor en todos los tratamientos con orujo de uva.

3.2.3 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N)

El Vm es el tratamiento con menor relación C:N (11.53), debido a que previamente se sometió al proceso de vermicompostaje, y en este proceso el lupinus fue mineralizado por los microorganismos, mientras el Av presentó la relación de 21.15. En este caso se puede atribuir a que se incubó el lupinus fresco y de esta forma pudo existir mayor cantidad de C disponible para los microorganismos (Cuadro 5).

El Av tuvo una relación mayor de C:N al inicio de la incubación (21.16), a medida que se va descomponiendo disminuyó el C, liberándose en forma de CO₂ y en esta situación el N pudo haberse utilizado por los microorganismos como fuente de energía (Figura 11).

Inicialmente el Av registró valores de C:N de 21.15 superiores al Cm y Vm. En el segundo muestreo el Av con 17.86 fue el único tratamiento que mostró diferencia significativa ($\alpha=0.05$) con respecto al Cm y Vm que tuvieron 12.19 y 11.41 de C:N. Los tratamientos, Cm y Vm, fueron estadísticamente iguales (12.19 y 11.41).

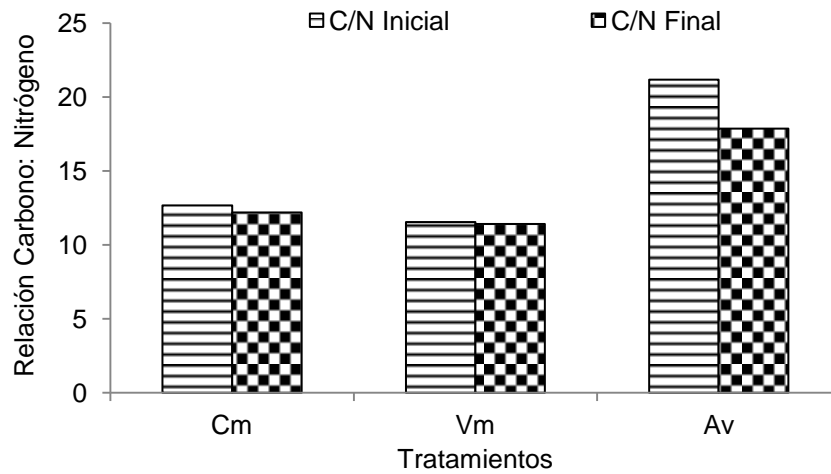


Figura 11. Relación C:N.
Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

Cuadro 5. Parámetros medidos al inicio y al final de la incubación.

Tratamiento	Inicial	Final	Tratamiento	Inicial	Final
pH					
Cm	8.16 a	8.27 a	Cm	2.558 b	2.997 b
Vm	7.9 b	7.75 b	Vm	2.808 a	3.853 a
Av	5.19 c	7.88 b	Av	1.307 c	2.474 c

MO (%)			C-orgánico (%)		
Cm	17.11 c	15.58 c	Cm	9.93 c	9.04 c
Vm	20.32 b	18.84 b	Vm	11.79 b	10.92 b
Av	68.58 a	30.41 a	Av	39.78 a	17.64 a

N (%)			C:N		
Cm	0.78 c	0.74 b	Cm	12.64 b	12.17 b
Vm	1.04 b	0.96 a	Vm	11.49 b	11.41 b
Av	1.88 a	0.99 a	Av	21.24 a	17.85 a

Medias con la misma letra dentro de la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$). Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

3.2.4 Humedad gravimétrica del suelo (%)

Los valores obtenidos para la constante PMP (15 bar) resultaron ser mayores en el tratamiento Vm (7.77%); para los tratamientos Av y Cm no hubo diferencia significativa, presentando valores de 9.18% y 9.05%, respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Contenidos de humedad.

	Contenidos de Humedad		
	PMP	CC	HA
Vm	7.77	17.09	9.32
Av	9.18	12.02	2.84
Cm	9.05	13.52	4.47

Para CC, el tratamiento que presentó mejor respuesta, siguió siendo el Vm con 17.09%, siendo 20.88% mayor que Cm, el cual obtuvo valores de 13.52% de CC, y 29.66% mayor que Av (12.02% de CC) (Figura 12).

En cuanto a la humedad aprovechable, el tratamiento que mostró valores más bajos fue el Av con 2.84%, siendo 3.28 veces más bajo que el tratamiento Vm (9.32%) y 1.57 veces que el Cm (4.47%).

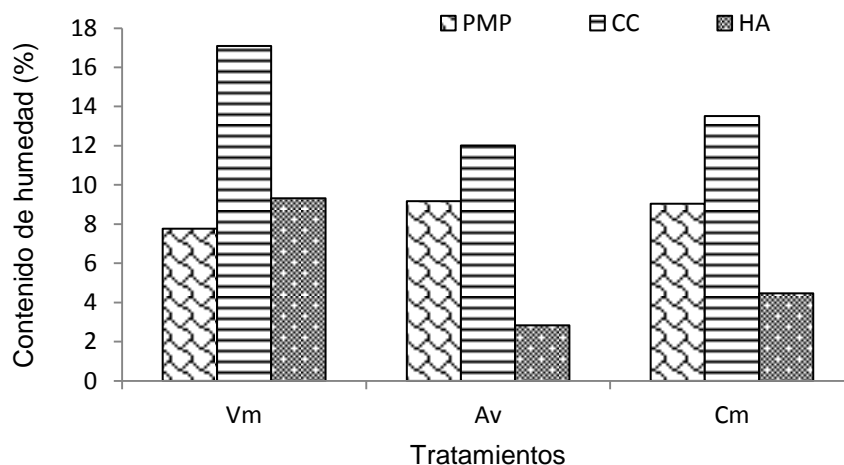


Figura 12. Constantes de humedad.
Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

Gráficamente se observó que en el tratamiento Vm, hubo variaciones de humedad al aplicar las diferentes tensiones de humedad; sin embargo, en los tratamiento Av y Cm, presentaron valores similares cuando se aplicaban tensiones mayores a 2.5 bar, en menores tensiones aplicadas (0.3, 0.5, 1) hubo cambios más notorios (Figura 13).

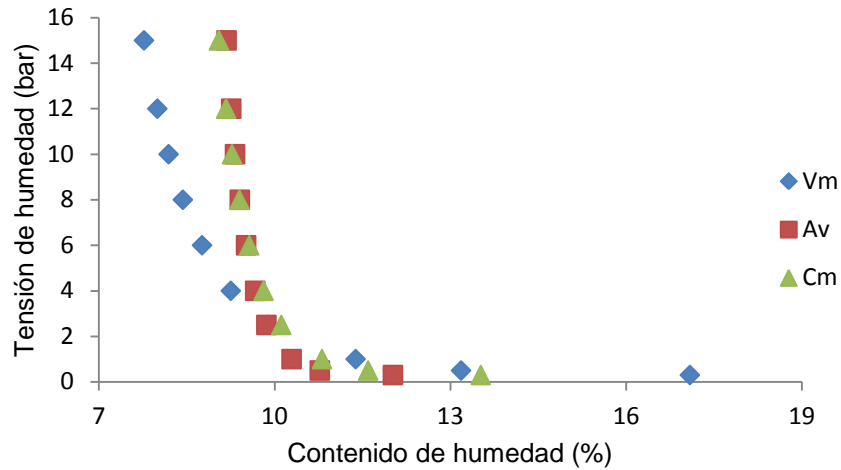


Figura 13. Curvas de retención de humedad. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

3.2.5 pH

Tanto el Cm como el Vm se clasificaron al inicio de la incubación como sustratos poco alcalinos (8.1 y 7.9, respectivamente) y el lupinus poco ácido (5.19). El lupinus, de acuerdo a Tang *et al.*, (1996) crece en bajos pH debido a que es sensible a un pH alto, ocasionando un menor crecimiento de las raíces por disminución de la elongación celular y la división no celular, y la reducción del volumen celular en la epidermis y la corteza externa. En medios con pH alcalino proliferan más las bacterias que los hongos, provocando una descomposición eficiente de la MO.

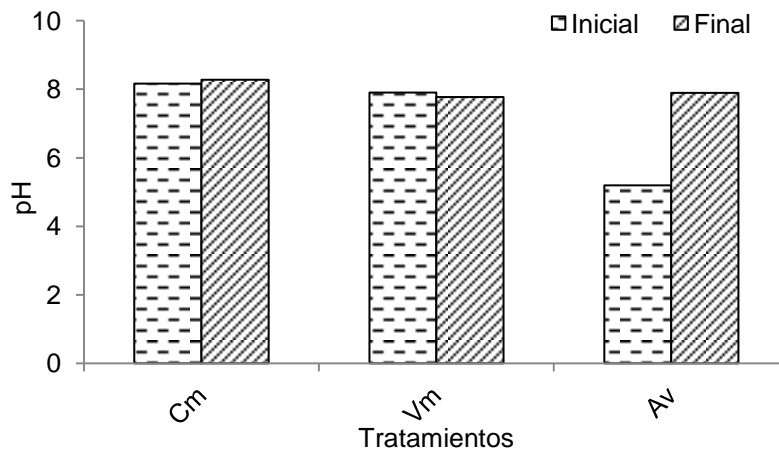


Figura 14. Medición de pH al inicio y al final de la incubación. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

Después de 58 días el pH no se modificó significativamente en el Cm (8.1 a 8.2) y la Vm (7.9 a 7.7) (Figura 14). Esto significa que al descomponerse la MO se liberó CO_2 y al combinarse con el H_2O generó H_2CO_3 , (ácido carbónico). Este es un ácido débil y hace que se reduzca el pH, aumentando la solubilidad y disponibilidad de fuentes de carbonato. Los tratamientos Cm y Vm mantuvieron un pH alcalino; a diferencia del Av, aumentó su valor de 5.1 (pH ácido) a 7.8 (pH alcalino), esto puede deberse a la oxidación de la MO en condiciones reductoras, debido a la actividad microbiana, que al descomponer la MO disuelta forma CO_2 , metano y aumento de los iones OH (Bautista *et al*, 2000).

El tratamiento Cm tuvo valores de pH superiores al Vm y Av; al final de la incubación, el Vm y el Av fueron tratamientos estadísticamente iguales.

3.2.6 Conductividad Eléctrica (CE dS m^{-1})

La CE tuvo un valor inicial de 2.558 dS m^{-1} , 2.808 dS m^{-1} y 1.308 dS m^{-1} en los tratamientos Cm, Vm y Av, respectivamente. Al terminar la incubación aumentaron en 0.43 dS m^{-1} para Cm, 1.042 dS m^{-1} para Vm y 1.162 dS m^{-1} para Av; teniendo al final del proceso valores de 2.99 dS m^{-1} , 3.85 dS m^{-1} , y 2.47 dS m^{-1} , respectivamente (Figura 15). El rango óptimo de salinidad para la producción agrícola se considera normal hasta un valor de 4 dS m^{-1} (Salazar *et al.*, 2004), lo cual significa que la aplicación de estos mejoradores no presentara problemas de salinidad para los suelos.

Los valores de CE indican que los microorganismos van consumiendo los compuestos solubles del sustrato, y se van formando compuestos inorgánicos como consecuencia de la mineralización de la MO que a su vez aumentan el valor de la CE durante el proceso, aumentando la concentración de sales, lo que concuerda con Isaza *et al* (2009).

El tratamiento Av desprendió mayor CO_2 durante los 58 días y presentó mayor degradación de MO, por lo que tuvo una diferencia en CE, aumentando 1.042 dS m^{-1} comparado con el tratamiento Cm que aumentó 0.43 dS m^{-1} .

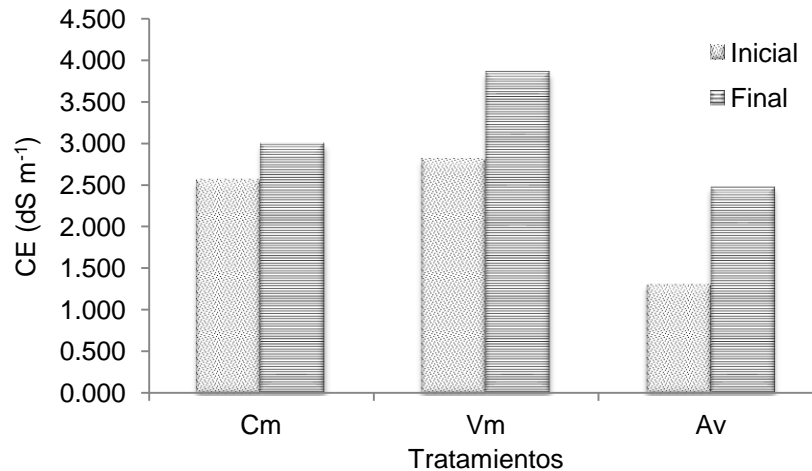


Figura 15. Diferencias de la Conductividad Eléctrica al inicio y al final de la incubación. Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde; CE=Conductividad Eléctrica.

La CE aumentó porque las sales propias de estos compuestos se solubilizan. Al inicio, el Vm tuvo mayor CE, lo cual se atribuye a la disponibilidad de iones y minerales generados durante la ingestión y excreción por las lombrices (Garg *et al.*, 2006), al final siguió siendo el más alto (3.85 dS m^{-1}) por el proceso de mineralización que continuó en la incubación.

3.2.7 Carbono Orgánico

Al inicio de la incubación, el tratamiento Av presentó mayor contenido de MO (68.58%), que al ser un material fresco tiene componentes de fácil descomposición, favoreció el crecimiento de la biomasa microbiana provocando una mayor pérdida de C en forma de CO_2 . A medida que progresó la mineralización, la biomasa microbiana tuvo menos C, por lo que la actividad disminuyó al no existir nuevos aportes orgánicos (Figura 16); mientras que el tratamiento Cm tuvo valores menores de MO (17.11%).

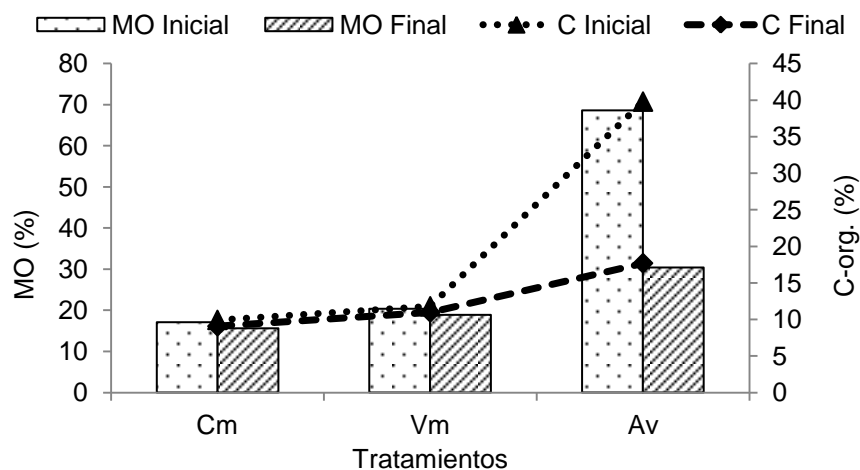


Figura 16. Contenido de Carbono Orgánico y de Materia Orgánica.

Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde; MO=Materia orgánica; C-org.=Carbono Orgánico.

Al final del proceso, el contenido de MO en Av fue menor que al inició (30.41%) como consecuencia del proceso de mineralización.

Durante el proceso de incubación el Av presentó mayor producción de CO₂ por lo que al final tuvo la mayor pérdida de C disminuyendo hasta un 55.65% de MO; mientras que el Cm y el Vm al tener un proceso previo de composteo contenían los residuos de más difícil descomposición y su cambio tanto de C como de MO fue mínimo, teniendo valores de 17.11% de MO en un inicio el tratamiento Cm y finalizando con 15.58%; y con Vm, de 20.31% finalizó con 18.84% de MO.

Lo mismo sucedió con el C orgánico, al inicio de la incubación. El Av presentó una mayor cantidad de C, con 39.78% y finalizó con 17.68%, siendo esto significativo. En el caso de los tratamientos Cm, y Vm, las concentraciones de C orgánico fueron similares porque hubo una menor bioxidación de los compuestos disponibles para los microorganismos. El cambio detectado fue poco relevante, de 9.93% a 9.06% en Cm y de 11.79% a 10.96% en Vm.

3.2.8 Nitrógeno Total

Hubo diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre tratamientos para la variable nitrógeno para las dos fechas de muestreo.

El tratamiento Av tuvo mayor N al inicio de la incubación con 1.88% y de 0.99% al final (Figura 17). Esto significa que se descompuso más rápido, ya que el N fue utilizado por los microorganismos, propiciando disminución al final de la incubación.

El tratamiento Cm tuvo menores pérdidas de N después de la incubación. La concentración fue de (0.4%), debido a que presentó una menor producción de CO₂. Por el contrario, el tratamiento Av que antes de la incubación presentó 1.88% y al final disminuyó hasta 0.89% de N por la actividad que tuvo en la producción de CO₂.

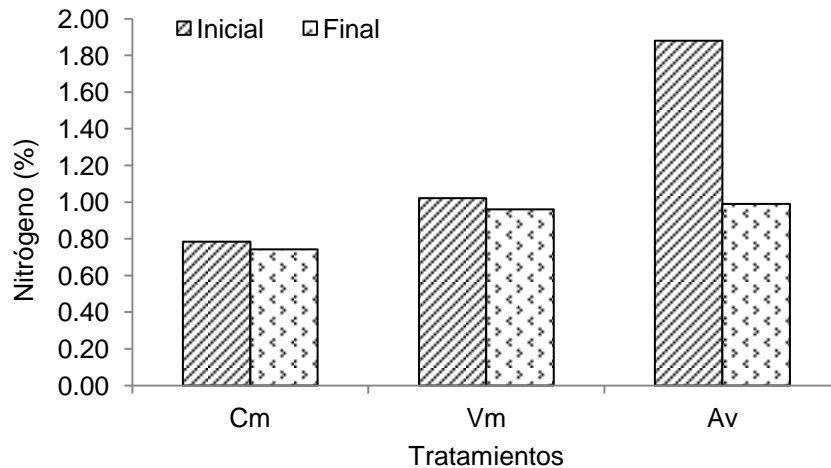


Figura 17. Porcentaje de Nitrógeno en los tratamientos.
Cm=Compost, Vm=Vermicompost, Av=lupinus verde.

El tratamiento Vm, al igual que el Cm, no tuvo cambios significativos, disminuyendo 0.6% de N, pasando de 1.02% a 0.96% de N.

3.3 Conclusiones

1. El tratamiento que presentó mayor porcentaje de germinación y mayor longitud radicular en las plántulas estudiadas fue el vermicompost, con 90% de germinación. Sin embargo ambos tratamientos (compost y vermicompost) se consideraron maduros, de acuerdo al Índice de Germinación (56.95 en Compost y 83.20 en Vermicompost).
2. El lupinus verde fue el tratamiento que tuvo mayor producción de CO₂ con un máximo de 649.44 mg de CO₂ g⁻¹ de mezcla.
3. El desprendimiento de CO₂, puede considerarse como uno de los parámetros sensibles a los cambios que ocurren en la transformación de la MO. Al respecto, se detectó una fase inicial de mineralización rápida, donde tiene lugar la descomposición de los compuestos fácilmente disponibles y otra fase final donde la mineralización es lenta; indicando el agotamiento de nutrientes para la microbiota involucrada en la descomposición.
4. Los mejoradores orgánicos estables mantuvieron e incrementaron el contenido de MO al permitir una menor pérdida de C orgánico en forma de CO₂
5. Los diferentes tratamientos produjeron variaciones importantes sobre la descomposición de la MO. Estos cambios dependen, de la naturaleza de los materiales, del proceso con los que fueron tratados, los materiales de partida, y de parámetros físicos y químicos, tales como: humedad, relación C:N y pH.

3.4 Literatura Citada

Acosta Y., J. Cayama, E. Gómez, N. Reyes, D. Rojas, H. García. 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencia*. 6:220-227.

Ansorena M., 1994. *Sustratos propiedades y caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid-España.

Arochas L. A. y P. Medina A. 2006. Evaluación microbiológica y de fitotoxicidad de relaves mineros de cobre acondicionados con mejoradores orgánicos y no orgánicos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Santiago de Chile.

Atiyeh, R.M., Domínguez, J., Subler, S., Edwards, C.A., 2000. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei* Bouche) and the effects on seedling growth. *Pedobiología* 44, 709–724.

Ayuso, M.; Pascual, J; García, C.; Hernández, T. 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Sci. Plant. Nutric.* 42: 105-111.

Bautista Z., F., M. Durán, R. Lozano. 2000. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. *Rev. Int. Ambiental.* 16(3) 89-101.

Contreras F.; J. Paolini; C. Rivero. 2006. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la cinética de la mineralización del carbono en suelos del municipio Rivas Dávila, estado Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 31: 37 -52.

Evans, G. C. 1972. *The quantitative analysis of plant growth*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, Reino Unido.

Garg P., A. Gupta, S. Satya. 2006. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Bioresource Technology*. 97: 391–395.

Isaza A., Ma. Pérez, JR Laines, G Castañón. 2009. Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo*. 25(3):233-243.

Jamieson, N., R. Monaghan, y D. Barraclough. 1999. Seasonal trends of gross N mineralization in a natural calcareous grassland. *Global change Biology*. 5:423-431.

Kjeldahl, J. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschreft fur Analytische Chemie*. 22: 366.

Lerch, R. N., K. A. Barbarick, L. E. Sommers, D. G. Wastfall. 1992. Sewage sludge proteins as labile carbon and nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal*. 56:1470-1476.

Richards, L. A. 1947. Pressure membrane apparatus: construction and use. *Agric. Eng.* 28: 451-454.

Rivero C., E. Hernández. 2001. Efecto de la aplicación de dos tipos de compost en la evolución de CO₂ y la actividad de fosfatasa en un suelo inceptisol. *Venesuelos* 9:24-32.

Salazar S. E., C. Vázquez V., J. A. Leos R., M. Fortis H., J. A. Montemayor T., R. Figueroa V., J. D. López M. 2004. Mineralización del estiércol bovino y su impacto en la calidad del suelo y la producción de tomate (*Lycopersicum*

sculentum Mill) bajo riego sub-superficial. Revista Internacional de Botánica Experimental OYTON. 53:259-273.

Tang C.; N. E. Longnecker, H. Greenway y A. D. Robson. 1996. Reduced root elongation of *Lupinus angustifolius* L. by high pH is not due to decreased membrane integrity of cortical cells or low proton production by the roots. Annuals of Botany. 78: 409-414.

Walkley A. y A. Black. 1934. An examination of the Degtjareffe method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29–38.

Zucconi F.; M. Forte, A. Monaco, M. De Bertoldi. 1985. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. p. 73-86. In: J. Gasser (Ed.). Composting of agricultural and other wastes. Elsevier Applied Science Publishing. London, England.

4. CAPITULO II. ENSAYO EN CAMPO

4.1 Materiales y métodos

4.1.1 Ubicación del experimento

La investigación en campo se llevó a cabo en el Municipio de Texcoco; en la localidad de San Pablo Ixayoc, Estado de México, en el mes de Marzo del 2010.

Se localiza en el Municipio de Texcoco, Estado de México, entre los cerros Tepechichilco y Cuacale, con altitud que fluctúa entre 2 560 a 2 650 m y está ubicado a 19°28'03" norte, 98°47'06" oeste. La zona se forma por pequeños parches de vegetación de Quercus, Abies y Pinus (Rodríguez *et al.*, 2011).

El clima es semi-frío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad C(E)(w2), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad C(w2) y C(w1) templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (García, 1973). En el intervalo de 2 600 a 3 000 m de altitud, la precipitación anual es de 800 a 1 100 mm (Cosío, 2001; citado por Rodríguez *et al.*, 2011). El tipo de suelo predominante es andosol y en menor proporción cambisol (Rodríguez *et al.*, 2011) es profundo y las pendientes son pronunciadas.

El suelo con el que se trabajó es franco arcilloso (44% arena, 30% arcilla, 26% limo).

4.1.2 Avena

Para los fines de estudio se utilizó como planta indicadora la avena criolla (*avena sativa sp.*), proporcionada por ejidatarios de San Pablo Ixayoc. La siembra se realizó al voleo usando 0.010 kg m⁻², aprovechando las condiciones de temporal.

4.1.3 Parámetros evaluados

Los parámetros físicos del suelo evaluados antes de la siembra y después de la cosecha fueron: densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez

permanente, distribución de agregados y los químicos lo conformaron pH, N, C, MO. Los métodos empleados se refieren en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros evaluados.

Parámetro	Método
Densidad aparente (DA g cm ⁻³)	Cilindro de volumen conocido
Capacidad de Campo (CC %)	Olla de Presión (Richards, 1947)
Punto de Marchitez Permanente (PMP %)	Membrana Permeable (Richards, 1947)
Distribución de agregados	Tamizado en seco
pH	Extracto acuoso relación 1:2 (Ansorena, 1994)
N (%)	Kjeldahl modificado (1883)
MO (%)	Walkley y Black, 1934

4.1.3.1 Retención de humedad

Para determinar el contenido de humedad a CC (%) y a PMP (%) se muestreo con una barrena cilíndrica previo a la siembra y después de la cosecha.

Se determinó la CC por medio de la olla de presión y el PMP con la membrana permeable (Figura 18). Se crearon gráficas tomando como base los valores de CC y PMP, para la curva de retención de humedad, empleando el modelo matemático propuesto por Palacios (1980).



Figura 18. Olla y Membrana de presión.

4.1.3.2 Distribución de agregados en seco

Después de la cosecha se realizó el muestreo final y se determinó la distribución de agregados del suelo por medio de tamizado en seco. El método utilizado es el

propuesto por Kemper y Rosenau (1986), que consistió en tomar una muestra de suelo, limpio de raíces y demás materiales orgánicos. La muestra se pasó por un juego de tamices con abertura de diámetros 6.36, 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 mm, y un receptor en el último tamiz donde caen los micro agregados del suelo. El tamizado se realizó mediante el uso de un vibrador diseñado para tal fin por un periodo de 10 minutos y una vez tamizado la cantidad de agregados retenidos por cada tamiz se pesaron por separado y posteriormente se calculó su contenido proporcional.

4.1.3.3 Coeficiente de estructuración (E)

Con base en los resultados del análisis del tamizado en seco se calculó el coeficiente de estructuración (E), el cuál se define por $E = (A/B)$, donde A es la suma de los agregados con diámetro entre 0.25 a 5.0 mm y B corresponde a la suma de los agregados menores a 0.25 y mayores a 5.0 mm (Kaurichev, 1984).

4.1.3.4 Estado estructural del suelo (EES)

El EES se evaluó desde un punto de vista agronómico y es igual al peso de los agregados de tamaño óptimo (0.25 a 5.0 mm) entre el peso total de la muestra. Es la relación entre las fracciones mecánicas dotadas de capacidad cementadora y las fracciones mecánicas que participan como material pasivo en la formación de la estructura (Kaurichev, 1984).

Para su interpretación se utilizó la siguiente escala de apreciación cualitativa del estado estructural del suelo (Cuadro 8).

Cuadro 8. Escala de apreciación cualitativa del estado estructural del suelo.

Tamizado en seco (%)	Estado Estructural del Suelo
>80	Excelente
80-60	Bueno
60-40	Satisfactorio
40-20	No satisfactorio
<20	Malo

Fuente: Kaurichev, 1984.

4.1.3.5 Diámetro Medio Ponderado (DMP)

Este parámetro se evaluó después de la cosecha a partir del porcentaje de agregados en seco retenidos en cada uno de los tamices, (6.36, 4.76, 3.36, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 mm, y un recibidor) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DMP = \sum (M_{ssi}(\%) * X_i) / 100$$

Donde:

M_{ssi} = agregados retenidos en cada tamiz (%).

X_i = Promedio de diámetro de abertura del tamiz (mm).

La estructura se evaluó empleando el criterio desarrollado por Le Bissonnais (1996) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Rangos para interpretar la estabilidad estructural con relación al DMP.

DMP (mm)	Clasificación (Cuantitativa)
< 0.4	Muy Inestable
0.4 – 0.8	Inestable
0.8 – 1.3	Medio
1.3 – 2.0	Estable
>2.0	Muy estable

4.2 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones, lo que generó doce unidades experimentales (Figura 19).

En un primer tratamiento se incorporó 25.22 kg de lupinus (Av); el segundo tratamiento fue urea (Uq) con 80 kg N ha⁻¹ aplicado al voleo al inicio del macollamiento de la avena y finalmente el testigo (T), sin incorporar nada al cultivo (Cuadro 10). Para los tratamientos Av como Uq se aplicó la misma dosis de fertilización.

Cuadro 10. Identificación de tratamientos

Tratamiento	Nombre	Clave
1	Lupinus	Av
2	Urea	Uq
3	Testigo	T

Se estableció la siembra de avena a campo abierto en el Ejido de San Pablo Ixayoc, en una parcela de 100 m², únicamente por un ciclo de cultivo. Se dio un manejo similar al empleado por los productores de la zona, considerando una dosis de siembra de 100 kg ha⁻¹, con una densidad de 250 plantas m⁻².

Se establecieron camas de cultivo de 4 m² cada una, con 4 repeticiones para cada tratamiento, resultando un total de 12 camas (Figura 20).

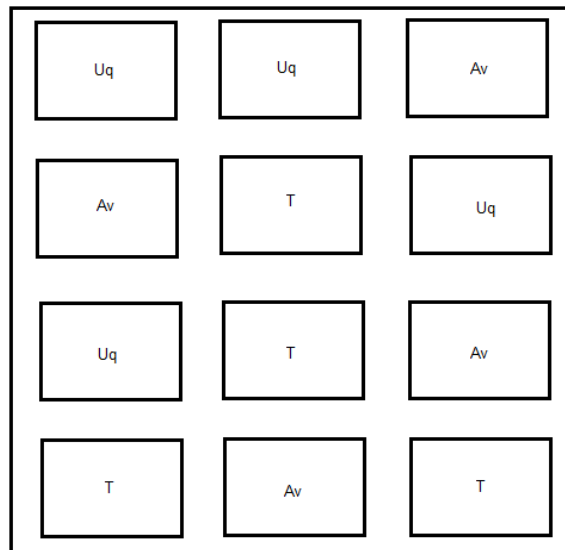


Figura 19. Croquis experimental.
Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.



Figura 20. Preparación del terreno.

Se molieron los residuos de lupinus con una máquina de martillos con toma de fuerza para tractor, con ventilador y tren de arrastre. Una vez molido, se procedió a la incorporación al suelo. Se sembró alrededor de la unidad experimental, para evitar y reducir los efectos de orilla.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Densidad aparente (DA g cm⁻³)

Las diferencias entre tratamientos fueron estadísticamente significativas para la densidad aparente. La DA disminuyó con la incorporación del Av 0.07 g cm⁻³ de 1.33 g cm⁻³ a 1.26 g cm⁻³ y con Uq disminuyó 0.04 g cm⁻³, de 1.32 g cm⁻³ a 1.28 g cm⁻³. Para el testigo únicamente disminuyó 0.01 g cm⁻³ (1.34 a 1.33 g cm⁻³) (Figura 21). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Rivero *et al.*, (1998) quienes señalan que los descensos de la DA dependen de los incrementos del C orgánico del suelo.

En el caso del Av, la DA descendió al incorporar el lupinus debido al C contenido en sus tejidos los cuales se irán descomponiendo. Respuesta similar se obtuvo para el tratamiento Uq, cuya característica es que también contiene C.

En el caso del testigo, al no aplicar ni urea ni MO al suelo, los valores de DA fueron antes de la siembra de 1.34 g cm⁻³ y después de la cosecha de 1.33 g cm⁻³. Los valores de DA obtenidos reflejan que es una propiedad sensible al contenido de MO. Diversos autores (Kehr, 1983; Rothon, 2000; Caravaca *et al.*, 2001) señalan que la incorporación de MO disminuye la DA, debido al aumento en la estabilidad de los agregados y la macroporosidad.

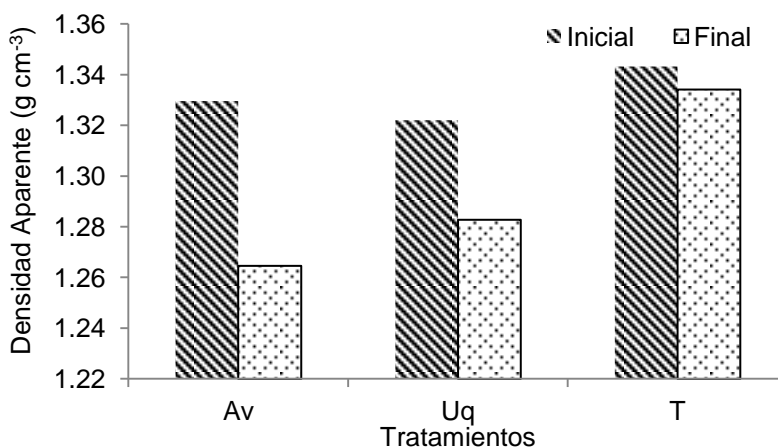


Figura 21. Densidad Aparente. Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

La influencia de la MO en las propiedades físicas depende de la cantidad, tipo y tamaño de materiales adicionados (Nelson y Oades, 1998). Durante la descomposición de la MO pudieron producirse sustancias aglutinantes ricas en C que incrementaron la agregación del suelo, favoreciendo la porosidad y reduciendo la DA.

La disminución de la DA en los tratamientos pudo incrementar la porosidad, ya que se generan espacios dentro del suelo por efecto del material orgánico adicionado. La aplicación del lupinus generó menores valores de DA de 1.33 a 1.26 g cm⁻³ comparado con el tratamiento testigo de 1.34 a 1.33 g cm⁻³.

Estos resultados concuerdan con Villamil *et al.*, (2006) que hallaron disminuciones de DA en respuesta a la introducción de cultivos de cobertura.

4.3.2 Retención de humedad (%CC, %PMP, %HA)

La CC antes de la siembra (Cuadro 11) tuvieron valores similares, oscilando entre 32.2% en el tratamiento T y 33.2% en el tratamiento Av, existiendo la mayor diferencia entre los tratamientos de 1.068% (33.2% de Av y 32.2% en T).

Los valores de CC, se incrementaron en todos los tratamientos; ligeramente en el T con 1.17%, en Uq con 3.41% y hasta 7.15% en Av.

Al incrementar la MO en las unidades experimentales de lupinus, aumentó el %CC, debido a que la MO ejerce una fuerza de cohesión sobre las partículas inorgánicas, formando agregados débiles con los que aumenta la cantidad de poros, y por lo tanto, el suelo retiene mayor cantidad de agua a su CC. Con T no hubo gran cambio ya que al no tener cambios significativos en MO el % de CC tuvo un ligero cambio (1.17%).

Se observan efectos positivos en las propiedades de retención de humedad, particularmente en los contenidos de humedad retenida a 0.3 bar, en el tratamiento Av. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Dimas *et al.*,

(2001), indican que a pesar de no haber diferencias estadísticamente significativas si hubo un ligero incremento de hasta el 10% en el contenido de humedad después de la incorporación de abonos orgánicos.

Los valores iniciales de PMP no tuvieron diferencias significativas ($\alpha=0.05$), siendo el mayor el tratamiento Uq con 13.5% y el menor con 12.2%.

En los valores de PMP hubo diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre los diferentes tratamientos, aumentando 5% más al final el tratamiento Av. Los tratamientos Uq y T aumentaron en menor proporción, 2.22% y 0.81%, respectivamente.

Los tratamientos tuvieron distintos contenidos de humedad a PMP, siendo mayor en el suelo con el tratamiento Av con 17.5% que en el T con 13.9%, esto implica que las plantas que estén en suelos con tratamiento Av se marchitan con un contenido de humedad mayor del suelo que las plantas que se encuentran en un suelo con tratamiento T; sin embargo, la tensión a que esta retenida esta agua es el mismo, -15 bares.

En la humedad aprovechable el tratamiento que aumentó más fue el Av con 1.87% estadísticamente diferente al testigo, el cual tuvo 0.36%.

El suelo que mayor retuvo humedad fue el que se le incorporó lupinus (tratamiento Av) ya que retuvo mayor humedad aprovechable (22.85%); al agregar MO (lupinus) afecta las características físicas del suelo, reteniendo mayor humedad. El suelo que menor retuvo fue el del tratamiento T (19.41%).

Cuadro 11. Porcentaje de humedad.

Tratamientos	CC	PMP	HA
	<u>Inicial</u>		
T	32.202 a	13.154 a	19.048 a
Av	33.270 a	12.289 a	20.981 a
Uq	32.757 a	13.569 a	19.189 a

	Final		
T	33.377 c	13.964 b	19.413 a
Av	40.423 a	17.569 a	22.854 a
Uq	36.166 b	15.795 b	20.371 a

Medias con la misma letra dentro de la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$). CC=Capacidad de Campo, PMP=Punto de Marchitez Permanente, HA= Humedad aprovechable, Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

Las curvas de retención de humedad (Figura 22) al inicio del experimento mostraron valores muy similares entre las unidades experimentales, pero una vez aplicado el lupinus en el tratamiento Av y urea en el Uq existieron cambios entre ellos (Figura 23).

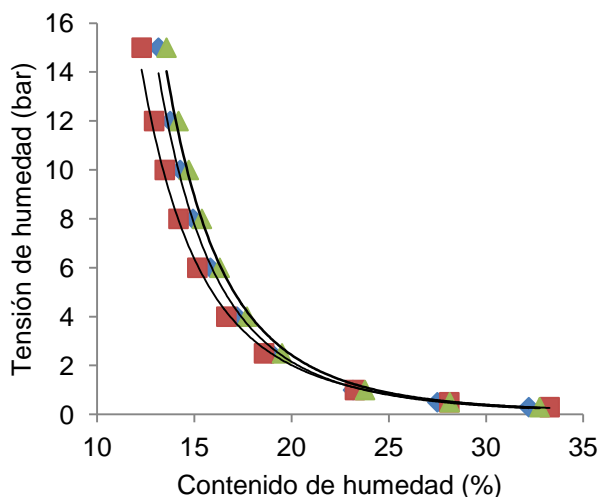


Figura 22. Curva de retención de humedad inicial.
Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

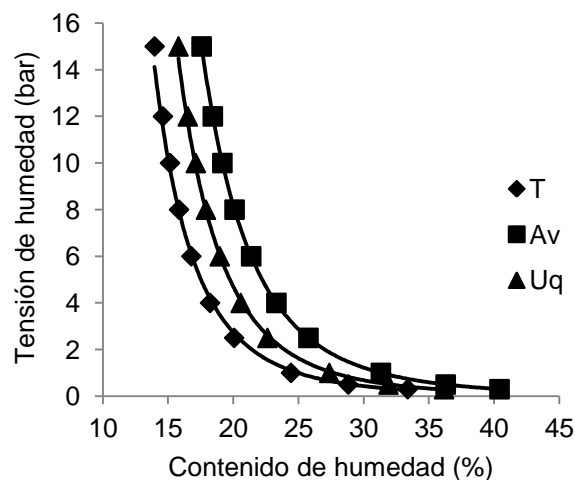


Figura 23. Curva de retención de humedad final.
Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

Habiendo un rango más amplio entre CC y PMP en el tratamiento Av, además que a cualquier tensión que se le aplicó a dicho tratamiento fue mayor la retención de humedad que en los otros dos tratamientos, por lo que en el Av hubo mayor disponibilidad de agua en el suelo.

4.3.3 Nitrógeno (%)

Los valores registrados permiten clasificarlos entre suelos medianamente pobres y medianamente ricos en el contenido de N total. Al inicio, los tratamientos Av y Uq presentaron valores de 0.167% mientras que el tratamiento testigo presentó un contenido de 0.168% (Figura 24).

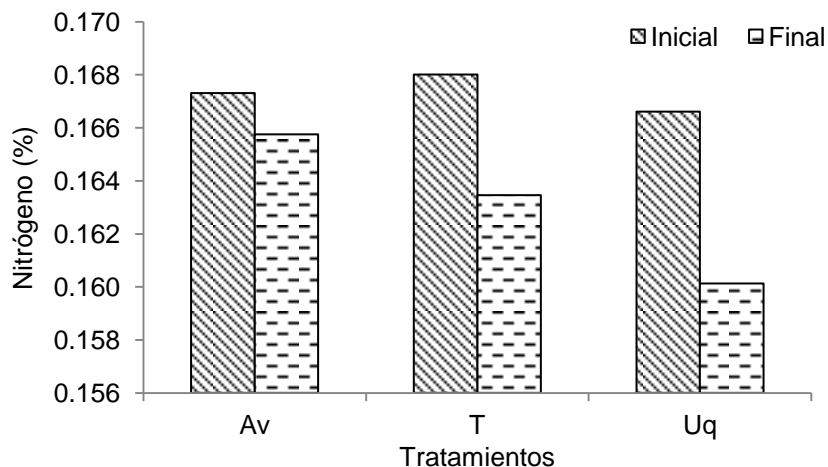


Figura 24. Nitrógeno.
Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

En el segundo muestreo, el contenido de N disminuyó de 0.167% a 0.166% en Av, de 0.168% a 0.163% en T y 0.167% a 0.160% en Uq. Esto puede atribuirse a que fue aprovechado por la avena.

En el caso de Uq al aplicar urea al inicio, la avena utilizó este compuesto para su desarrollo y crecimiento. Con el tratamiento control, al no aplicar N, la avena pudo aprovechar el N disponible en el suelo. Mientras que el tratamiento con Av tuvo un descenso de 0.001% de N, porque la siembra utilizó el N proporcionado por lupinus.

De acuerdo al análisis de N, los tratamientos no tuvieron efecto significativo del porcentaje de N. Esto se puede atribuir al lento cambio en el tiempo de las fuentes lábiles y recalcitrantes de N del suelo que constituye el N total (Sainju *et al.*, 2003; citado por Villamil *et al.*, 2003).

4.3.4 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N)

Los valores obtenidos para el primer muestreo fueron de 15.96 para Av, de 16.34 para T y de 17.36 para Uq, en tanto que para el segundo muestreo fueron de 19.66, 17.79 y 20.93, para los tratamientos Av, T y Uq, respectivamente.

Al inicio, la baja relación C:N permitió cierta mineralización. Al tiempo en que se descompuso la MO se incorporó (lupinus) y éste al tener una relación C:N baja, permitió en menor tiempo la inmovilización neta menor.

El suelo con el tratamiento Av, tuvo la menor relación al inicio (15.96), incrementando 3.7 para al final de la cosecha, quedando con una relación de 19.66.

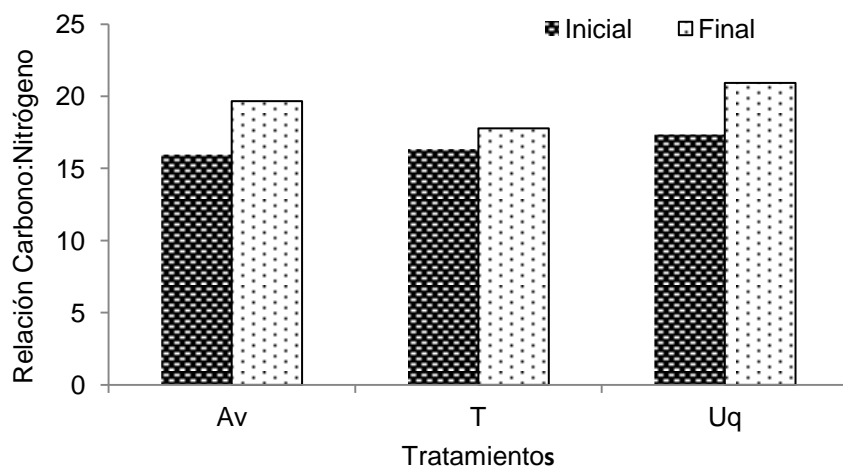


Figura 25. Relación Carbono: Nitrógeno.
Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

Después de la cosecha aumentó la cantidad de MO, por lo que hubo menos N disponible en el suelo. Este fue inmovilizado por la microbiota y hubo menos para ser asimilado por las plantas (Figura 25).

La presencia de suficiente N en el tratamiento Av (0.167%) en el suelo, permite altos niveles de descomposición del material carbonado, al posibilitar una adecuada relación C:N (19.66), aumentando de esta manera el CO₂ desprendido producto de la biodegradación microbiana.

4.3.5 Carbono Orgánico (%)

Respecto a la materia orgánica, en los tratamientos con aplicación de MO a base de lupinus (Av) aumentó de 4.6 a 5.7 (1.01%) y el tratamiento con urea (Uq) incrementó de 5 a 5.7 (0.76%), el testigo tuvo un incremento de 4.7 a 5 (0.25%) (Figura 26). En todos los tratamientos hubo un incremento; sin embargo, la fertilización orgánica (Av) incrementó 0.25% más que la mineral (Uq).

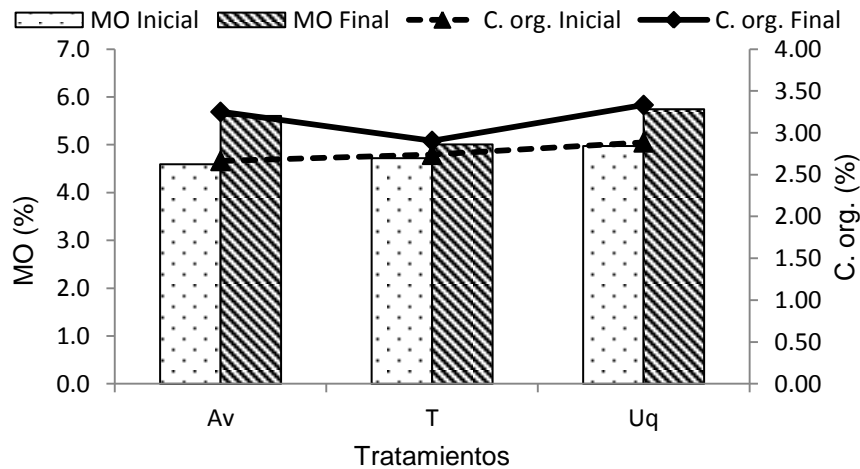


Figura 26. Distribución de contenido de MO.

MO=Materia orgánica, C. org.=Carbono orgánico, Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

El C orgánico estimado aumentó en la misma proporción en todos los tratamientos.

De acuerdo a Martínez *et al.*, (2008), el C orgánico del suelo favorece el mejoramiento de algunas propiedades físicas del suelo, como se discutirá más adelante con el incremento de la MO y C org. del suelo disminuyó la DA, aumentó la retención de humedad y se modificó la estructura del suelo.

4.3.6 Distribución de agregados

En el Cuadro 12, se observa la distribución de agregados para los diversos rangos evaluados.

Cuadro 12. Composición de agregados sometido a diferentes tratamientos (tamizado en seco).

Número tamiz (mm)	Tamaño de los agregados (mm)								Coef. de estructuración E	DMP
	> 6.36	4.76	3.36	2	1	0.5	0.25	< 0.25		
Av	4.89	17.68	7.31	8.63	15.46	2.86	8.68	34.50	1.54	1.76
T	5.44	4.86	5.11	4.98	16.50	17.15	10.01	35.95	1.42	1.12
Uq	3.87	5.03	4.36	4.98	15.80	17.24	9.99	38.74	1.35	1.00

Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

Del 60 al 65% del contenido total de las muestras de los tratamientos, correspondieron los agregados con diámetro de 0.25 a > 6.36 mm.

En la Figura 27 se muestra la tendencia que siguieron los contenidos de los macro agregados. El tratamiento Av tuvo menor porcentaje de micro agregados (34.5%), comparado con Uq que tuvo 38.74%. Las variaciones de los macro agregados no mostraron variaciones significativas, todos los tratamientos mostraron valores similares.

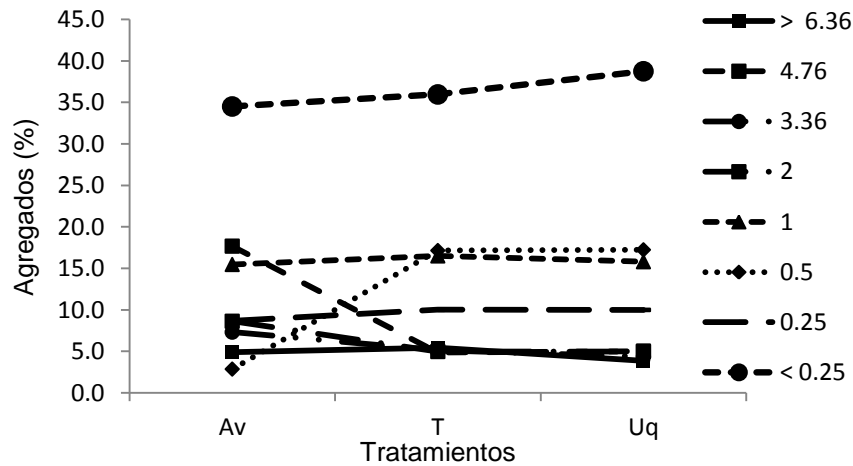


Figura 27. Porcentaje de agregados (tamizado en seco) de tamaño < 0.25 a > 6.36 mm. Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

La incorporación de lupinus en el tratamiento Av provocó que el tamaño de los agregados de 4.76, 3.36 y 2 mm aumentaron más de 12, 2 y 4%, respectivamente.

Mientras que en los agregados de tamaño 0.5 mm, el tratamiento Av fue el que presentó menor cantidad con 2.86%.

En los tamaños de 0.25, 1 y mayores a 6.36 mm, el porcentaje de agregados de los tres tratamientos fue similar.

Para los agregados menores a 0.25, el tratamiento Uq fue el que demostró mayor cantidad con 38.74%, comparado con Av y T que obtuvieron 34.5% y 35.95%, respectivamente.

Sustaita *et al*, (2000) observaron una disminución en el grado de agregación del suelo, del cambio de vegetación natural a agrícola; teniendo un contenido de micro agregados mayor (62%).

La proporción de micro agregados se considera como un indicador de la degradación estructural del suelo (Boersma y Kooistra, 1994). Además, la disminución en la estabilidad de agregados puede atribuirse en gran medida al menor contenido de MO de los suelos laboreados.

4.3.6.1 Coeficiente de estructuración

Se observó que a mayor valor del coeficiente de estructuración, mayor es la estabilidad estructural del suelo (Figura 28).

De los tres tratamientos, el tratamiento Av fue el que mayor coeficiente de estructuración obtuvo (1.54) y un mayor EES de 65.5%; pudiéndose atribuir a la aplicación de lupinus.

Se ha encontrado una alta correlación entre el contenido de MO y la agregación, así como con la estabilidad de los agregados formados, debido a la acción enlazante de las sustancias húmicas y otros productos generados por la actividad microbiana (Pulido *et al.*, 2009). En general, la MO promueve la estabilidad de los agregados porque reduce el hinchamiento del agregado, disminuye la

permeabilidad del agregado, reduce las fuerzas destructivas del fenómeno de estallido y aumenta la fuerza intrínseca de los agregados (Fortun y Fortun, 1989).

El tratamiento que presentó menor coeficiente y menor estabilidad fue el Uq con 1.35 y 61.27%, dado que presentó menor cantidad de MO.

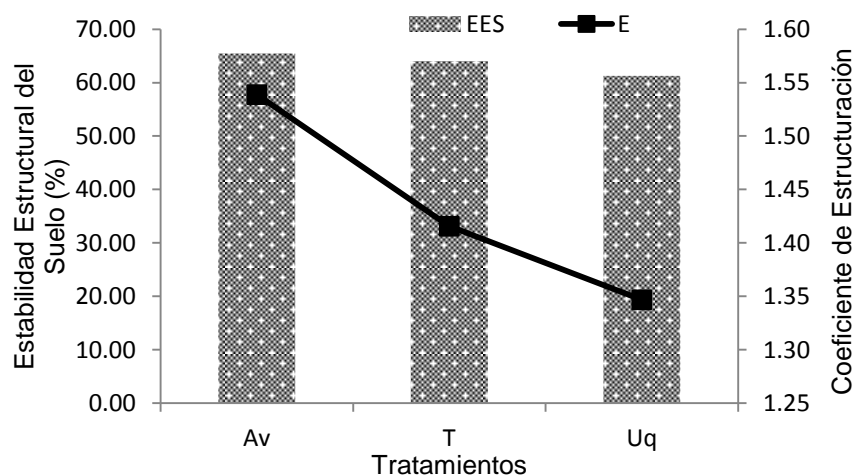


Figura 28. Estabilidad estructural del suelo y su relación con el coeficiente de estructuración.

EES=Estado estructural del suelo, E=Coeficiente de estructuración, Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

En general, la estabilidad estructural se mantuvo en los tres tratamientos; sin embargo, el coeficiente de estructuración fue el que cambió en mayor proporción, habiendo una diferencia entre el tratamiento Uq, y el Av de 0.19.

4.3.6.2 Estado Estructural del suelo (EES)

Los valores de EES de los tratamientos variaron de 61.2 a 65.5%, por lo que fueron catalogados como con buenos estados estructurales para los tres tratamientos (Cuadro 13).

Los valores del EES reflejan poca variabilidad entre tratamientos, los cambios que ocurren bajo las diferentes aplicaciones de abono verde y urea pueden atribuirse al poco tiempo de estudio que se tuvo en observación, ya que la MO incrementa la cohesión de los agregados del suelo en un periodo mayor a cuatro años (Tisdale y Oades, 1982).

Cuadro 13. Evaluación del estado estructural del suelo en San Pablo Ixayoc con diferentes tratamientos.

Tratamiento	Estado estructural del suelo	
Av	65.50	Bueno
T	64.01	Bueno
Uq	61.27	Bueno

Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

El rompimiento de los agregados del suelo trae como consecuencia un aumento de la superficie específica de las partículas del suelo, una continua exposición a microorganismos del suelo y una mayor oxidación del C en forma de CO₂ que está presente en los compuestos que tienen cohesión con la fracción mineral del suelo (Báez, 2001). Por lo tanto, la pérdida de la estructura del suelo también ocasiona una disminución en la fertilidad del suelo (Báez, 2001), que es lo que ocurre con el uso de fertilizantes. En este caso con la urea, que impide que se vaya degradando el suelo y pierda su estructura.

La mejora de la estabilidad estructural mediante la incorporación de lupinus actuó como núcleo en la formación de macro agregados y el entramado físico de raíces finas y pequeños agregados dando lugar a la formación de agregados más grandes (Six *et al.*, 2000).

4.3.6.3 Diámetro Medio Ponderado (DMP)

Los valores del DMP que se obtuvieron en los distintos tratamientos fueron de 1.76, 1.12 y 1 mm en Av, T y Uq. De acuerdo a la clasificación de Le- Bissonnais (1996), el tratamiento Av donde se aplicó lupinus permite clasificarlo como estables; en tanto que los tratamientos con urea y el testigo se clasifican como medio.

En la Figura 29 se observa que los valores de DMP con incorporación de lupinus se modifica el diámetro de los agregados, el cual indica predominio de agregados mayores a 0.25 mm favorables para el desarrollo de los cultivos, por lo que el

tratamiento Av fue estadísticamente superior ($\alpha=0.05$) al DMP obtenido con urea y el testigo.

El tratamiento Av registró el mayor DMP con el aumento de MO; con este hubo una diferencia de 0.76 mm entre el tratamiento con mayor diámetro (Av) y el de menor (Uq).

El suelo con el que se trabajó está dentro del rango de agregados que propician las condiciones físicas óptimas en la capa arable para el desarrollo de los cultivos, en particular de la avena.

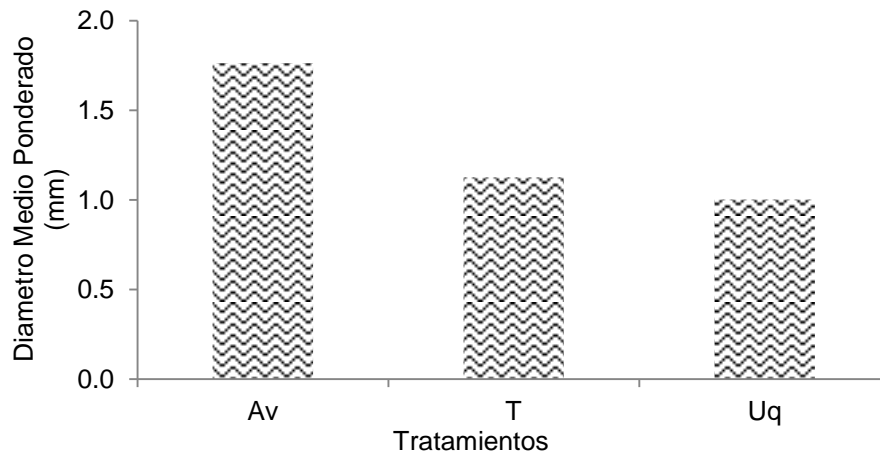


Figura 29. Efecto de fertilización en el DMP de agregados. Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

4.3.7 Rendimiento (kg m^{-2})

Se registraron pequeñas diferencias (0.125 kg m^{-2}) entre los tratamientos de fertilización con urea y con lupinus, siendo mayor en el tratamiento Av con 1.95 kg m^{-2} (Cuadro 14). El testigo presentó rendimientos de 1.5 kg m^{-2} .

Cuadro 14. Rendimiento kg m^{-2} .

Tratamiento	Rendimiento kg m^{-2}
Av	1.95
Uq	1.825
T	1.525

Av=lupinus, Uq=urea, T=Testigo.

Los resultados que se obtuvieron de rendimiento entre el tratamiento Av y el Uq son similares debido a que la dosis de fertilización que se aplicó fue la misma, cambiando únicamente el tipo de fertilización, siendo del tipo orgánica con lupinus (Av) y la otra mineral con urea (Uq).

Lo que favoreció al tratamiento Av en el rendimiento, fue que se sumaron propiedades del suelo que permitieron un mejor aprovechamiento de N, una mayor humedad y agregados más estables.

Los resultados del rendimiento han mostrado la posibilidad de utilizar los abonos verdes y, en especial el lupinus, como sustitutos de la urea e incrementar los rendimientos del cultivo de avena (Figura 30). Al igual que García *et al.*, (1996) que al utilizar *Crotaria juncea* y *Vigna unguicuata* como abono verde incrementaron los rendimientos del cultivo de calabaza.



Figura 30. Ensayo en campo.

A través del lupinus fue posible incorporar MO y nutrientes al suelo, para mejorar sus características químicas y lograr sustituir las necesidades de nutrientes del cultivo incrementando su rendimiento potencial.

4.4 Conclusiones

1. La incorporación de lupinus produjo modificaciones favorables en las propiedades físicas y químicas del suelo, manifestadas particularmente, en una disminución en los valores de DA, incrementos en la retención de humedad, aumento de MO, estado estructural del suelo mayor de 65.5% y por consiguiente mayor coeficiente de estructuración, un diámetro medio ponderado considerado como estable y un rendimiento mayor de 1.95 kg m^{-2} .
2. El incremento en la estabilidad de agregados con el tratamiento Av permitió la estabilización de los agregados.
3. Los resultados demostraron la factibilidad de la utilización del lupinus, como sustituto de fertilizantes químicos nitrogenados y el incremento de la productividad del suelo y los rendimientos del cultivo de la avena.

4.5 Literatura citada

Ansorena M., 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid-España.

Báez, P. A. 2001. Dinámica del Carbono orgánico en tepetates cultivados. Colegio de Postgraduados. Tesis de maestría en Ciencias. Motecillo, Estado de México.

Boersma, O. H., y M. J. Kooistra. 1994. Differences in soil structure of silt loam Typic Fluvaquents under various agricultural management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 51: 21-42.

Caravaca, F., A. Lax y J. Albaladejo. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1235-1238.

Dimas L., A. Díaz, E. Martínez y R. D. Valdez. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *TERRA* 19:293-299.

Fortun, C., y A. Fortun. 1989. Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización de los agregados del suelo. *Edafol. Agrobiol.* 48: 185-204.

García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen, México, D.F.

García M., E. Treto, M. Álvarez, L. Fernández y T. Hernández. 1996. Estudio comparativo de diferentes especies de abonos verdes y cuantificación del aporte de Nitrógeno en el cultivo de la calabaza. *Cultivos Tropicales* 17(3):9-16.

Kemper, W. D. y R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In*: C. A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9 Part 2. Soil Science Society of America, Inc. Publisher. Madison, WI. USA.

Kjeldahl, J. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschreft fur Analytische Chemie*. 22: 366.

Le- Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.

Martínez H, E., J. P. Fuentes, E. Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8(1): (68-96).

Nelson, P. N. y J. M. Oades. 1998. Organic matter, sodicity, and soil structure. Pp. 51-75. *In*: M. E. Summer and R. Nidu. *Sodic Soils* (eds). Oxford University Press, New York, USA.

Palacios V. E. 1980. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuándo y cuánto regar. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Pulido M., M., D. Lobo L. y Z. Lozano P. 2009. Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia* 43(3): 221-230.

Richards, L. A. 1947. Pressure membrane apparatus: construction and use. *Agric. Eng.* 28: 451-454.

Rivero C., D. Lobo y A. López. 1998. Efectos de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades físicas de un alfisol degradado. *Venesuelos* 30:29-33.

Rodríguez R. L., J. A. Zavala y L. Pacheco. 2011. Presencia, abundancia y estrategias reproductivas de helechos en áreas alteradas de la Sierra Nevada, México. *Rev. Biol. Trop.* 59 (1): 417-433.

Six, J.; K. Paustian; E. T. Elliott y C. Combrink. 2000. Soil structure and soil organic matter: I Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.

Sustaita, R. F., V. Ordaz, C. Ortiz-S. y F. León G. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia* 34(4): 79-386.

Tisdale J. y J. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science.* 33: 141-163.

Villamil, M. B.; G. A. Bollero; R. G. Darmody; F. W. Simmons & D. G. Bullock. 2006. No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.

5. APÉNDICE

Cuadro 15. Pruebas de TUKEY al inicio de incubación.

pH			Conductividad Eléctrica (dS m ⁻¹)			Materia Orgánica (%)		
DMS	0.1734		DMS	0.094		DMS	2.5069	
Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	tra
A	8.168	Cm	A	2.808	Vm	A	68.58	Av
B	7.916	Vm	B	2.556	Cm	B	20.324	Vm
C	5.198	Av	C	1.308	Av	C	17.1153	Cm
Carbono (%)			Nitrógeno (%)			Relación C:N		
DMS	1.4549		DMS	0.1373		DMS	1.93	
Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	Tra
A	39.7796	Av	A	1.8788	Av	A	21.2429	Av
B	11.7878	Vm	B	1.0416	Vm	B	12.6443	Cm
C	9.9277	Cm	C	0.7896	Cm	C	11.4916	Vm

Cuadro 16. Pruebas de TUKEY al final de incubación.

pH			Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)			Materia Orgánica (%)		
DMS	0.293634		DMS	0.1413		DMS	1.5338	
Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	Tra	Tukey Grouping	Mean	Tra
A	8.278	Cm	A	3.858	Vm	A	30.41	Av
B	7.886	Av	B	2.99	Cm	B	18.84	Vm
B	7.758	Vm	C	2.474	Av	C	15.58	Cm
Carbono (%)			Nitrógeno (%)			Relación C:N		
DMS	0.8899		DMS	0.2081		DMS	2.4416	
Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	tra	Tukey Grouping	Mean	Tra
A	17.64	Av	A	0.996	Av	A	17.854	Av
B	10.926	Vm	A	0.964	Vm	B	12.176	Cm
C	9.04	Cm	B	0.744	Cm	B	11.414	Vm

Cuadro 17. Pruebas de TUKEY ensayo en campo.

Densidad Aparente (g cm ⁻³)				Humedad Aprovechable (%)				Capacidad de Campo (%)			
DMS		0.0147		DMS		3.6124		DMS		2.3476	
Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra	
A	1.335	T		A	22.843	Av		A	40.4175	Av	
B	1.285	Uq		A	20.633	Uq		B	36.1725	Uq	
C	1.265	Av		A	19.395	T		C	33.365	T	
Punto de Marchitez Permanente (%)				Diametro Medio Ponderado (mm)				Coeficiente de Estabilización			
DMS		2.4229		DMS		0.2047		DMS		0.4176	
Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra	
A	17.57	Av		A	1.7625	Av		A	1.54	Av	
B	15.5325	Uq		B	1.125	T		A	1.425	T	
B	13.9625	T		B	1	Uq		A	1.3675	Uq	
Estado Estructural del Suelo (%)				Relación C:N				Nitrógeno (%)			
DMS		7.3504		DMS		10.015		DMS		0.0168	
Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra		Tukey	Mean	tra	
A	65.5	Av		A	20.933	Uq		A	0.16575	Av	
A	64.045	T		A	19.665	Av		A	0.1635	T	
A	61.258	Uq		A	17.79	T		A	0.16025	Uq	
Materia Orgánica (%)				Carbono Orgánico (%)				Rendimiento (kg m ⁻²)			

La Incorporación de materia orgánica a través de Lupinus para la fertilidad del suelo

DMS 2.7564			DMS 1.603			DMS 0.5831		
Tukey	Mean	tra	Tukey	Mean	tra	Tukey	Mean	tra
A	5.7475	Uq	A	3.3425	Uq	A	1.95	Av
A	5.605	Av	A	3.2575	Av	A	1.825	Uq
A	5.0075	T	A	2.91	T	A	1.525	T