



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

CAMBIOS EN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO POR FACTORES INTRÍNSECOS EDÁFICOS Y DE MANEJO

ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Adrián Hernández Pérez, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Arturo Galvis Spinola, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis CAMBIOS EN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO POR FACTORES INTRÍNSECOS EDÁFICOS Y DE MANEJO

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución. El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 20 de Noviembre de 2018


Firma del
Alumno (a)


Dr. Arturo Galvis Spinola
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: “**CAMBIOS EN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO POR FACTORES INTRÍNSECOS EDÁFICOS Y DE MANEJO**” realizado por el alumno “**ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ**” bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



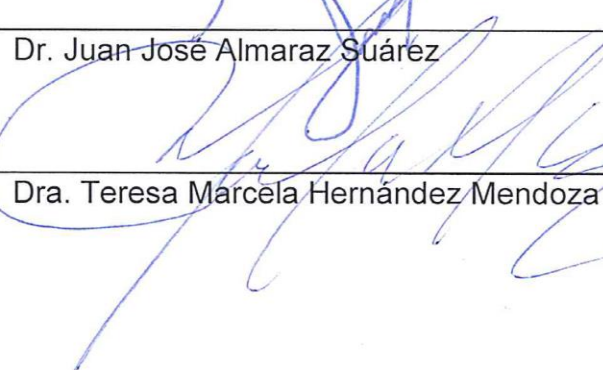
Dr. Arturo Galvis Spinola

ASESOR



Dr. Juan José Almaraz Suárez

ASESORA



Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2018

CAMBIOS EN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO POR FACTORES INTRÍNSECOS EDÁFICOS Y DE MANEJO

Adrián Hernández Pérez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El agua que aprovechan las plantas para su crecimiento y desarrollo, es función de la transferencia del vapor que fluye a través de ellas desde el suelo hasta la atmósfera, razón por la cual el agua que se almacena en el medio edáfico es vital para evitar algún grado de estrés hídrico. Por otro lado, casi $\frac{3}{4}$ partes de todos los usos posibles del agua son empleados en agricultura y cada vez más hay mayor necesidad por los recursos hídricos, por ello es indispensable proponer estrategias que optimicen su eficiencia de aprovechamiento. Para identificar acciones dirigidas a mejorar el aprovechamiento del agua en el medio agrícola, en la presente investigación se estudió el efecto de la materia orgánica y el contenido de arcilla sobre la capacidad de retención de humedad en diferentes tipos de suelos, así como su variación a través de la adición de distintos materiales orgánicos (turba, compost, paja de avena y de alfalfa). La capacidad de almacenamiento de agua en el medio edáfico se evaluó a través de una técnica termogravimétrica, sometiendo cada muestra estudiada a una temperatura constante de 50°C, lo que induce una evaporación paulatina registrada por gravimetría hasta llegar a peso constante. Se probó el efecto de diferentes dosis de cada material orgánico (turba, compost, paja de avena y de alfalfa) de manera directa y posterior a su incubación por 10 días a capacidad de campo y 30°C. Entre las variables de estudio, la arcilla tuvo el mayor efecto significativo sobre el almacenaje hídrico en el suelo seguido por el contenido de materia orgánica nativa, mientras que para los residuos evaluados la retención de humedad en el suelo varió en la siguiente secuencia: turba > compost > paja de avena > paja de alfalfa. En todos los casos varió la retención de humedad de manera directa y proporcional a la dosis aplicada. De acuerdo con la información generada en esta investigación, la adición de materiales orgánicos modifica de manera positiva la capacidad del suelo para almacenar agua.

Palabras clave. Termogravimetría, humedad del suelo, enmiendas orgánicas

CHANGES IN SOIL MOISTURE STORAGE CAPACITY BY INTRINSIC EFFECTS AND HANDLING FACTORS

Adrián Hernández Pérez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

The water used by the plants for their growth and development is a function of the transfer of the steam that flows through them from the ground to the atmosphere, reason why the water that is stored in the edaphic environment is vital to avoid some degree of water stress. On the other hand, almost $\frac{3}{4}$ parts of all possible uses of water are used in agriculture and there is an increasing need for water resources, which is why it is essential to propose strategies that optimize their efficiency of use. To identify actions aimed at improving the use of water in the agricultural environment, in the present investigation the effect of organic matter and clay content on the moisture retention capacity in different soil types was studied, as well as its variation to through the addition of different organic materials (peat, compost, oat straw and alfalfa). The storage capacity of water in the soil environment was evaluated through a thermogravimetric technique, subjecting each sample studied to a constant temperature of 50 ° C, which induces a gradual evaporation recorded by gravimetry until reaching a constant weight. The effect of different doses of each organic material (peat, compost, oat straw and alfalfa) was tested directly and after incubation for 10 days at field capacity and 30 ° C. Among the study variables, the clay had the most significant effect on water storage in the soil followed by the content of native organic matter, while for the residues evaluated the moisture retention in the soil varied in the following sequence: peat > compost > oat straw > alfalfa straw. In all cases, moisture retention varied directly and proportionally to the dose applied. According to the information generated in this research, the addition of organic materials positively modifies the capacity of the soil to store water.

Keywords. Thermogravimetry, soil moisture, organic amendments

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el apoyo económico para ser posible mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados por la oportunidad de formar parte de sus estudiantes y brindarme todo lo necesario para desarrollar mi proyecto de investigación de Maestría en Ciencias.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola por su apoyo incondicional, por compartirme de su valioso tiempo, conocimiento y amistad.

Al Dr. Juan José Almaraz Suárez por sus correcciones y apoyo en este trabajo de investigación.

A la Dra. Teresa Marcela Hernández por todas las facilidades y confianza para la utilización de los equipos e instalaciones.

Al Dr. Gerardo Sergio Benedicto Valdéz por sus aportaciones y observaciones para finalizar la escritura de mi tesis.

A todos los laboratoristas y trabajadores del COLEGIO DE POSTGRADUADOS y de CHAPINGO que me apoyaron, ya que con sus conocimientos facilitaron las actividades para realizar éste trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 Calidad del suelo.....	2
• Humedad del suelo.....	2
• Importancia de la humedad del suelo.....	3
• Retención de humedad de los suelos por efecto de la materia orgánica.....	3
• Pérdida de la humedad del suelo.....	6
• Manejos para conservar la humedad.....	6
2.2 Determinación de humedad del suelo.....	7
• Problemática.....	7
• Métodos para la determinación de humedad.....	7
• Método termogravimétrico (T _G).....	8
• Estudios previos.....	9
CAPITULO III. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	12
3.1 Objetivos.....	12
○ Objetivo general.....	12
○ Objetivo específico 1.....	12
○ Objetivo específico 2.....	12
3.2 Hipótesis.....	12
○ Hipótesis 1.....	12
○ Hipótesis 2.....	12
CAPITULO IV. MATERIALES Y METODOS.....	13
• Área de estudio.....	13
• Determinación de la humedad.....	13
• Técnica.....	13
4.1. Variación de la retención de la humedad por efecto del contenido de arcilla.....	14
○ Preparación de las muestras de suelo.....	14
○ Oxidación de la materia orgánica (MO).....	14
○ Hidratación de muestras.....	14
○ Diseño experimental.....	14
○ Preparación de las muestras de suelo.....	15
○ Hidratación de muestras.....	15

4.2. Variación de la retención de la humedad por efecto del material orgánico aplicado	16
○ <i>Preparación de las muestras de suelo</i>	16
○ <i>Preparación de la muestra de turba</i>	16
○ <i>Hidratación de muestras</i>	16
○ <i>Preparación de las muestras de compost y turba</i>	17
○ <i>Hidratación de muestras</i>	17
○ <i>Preparación de las muestras de los materiales orgánicos</i>	17
○ <i>Hidratación de muestras</i>	17
○ <i>Diseño experimental</i>	18
○ <i>Preparación de las muestras de suelos</i>	18
○ <i>Preparación de las muestras de los materiales orgánicos</i>	18
○ <i>Hidratación de muestras</i>	18
○ <i>Preparación de las muestras de suelos</i>	19
○ <i>Preparación de las muestras de compost</i>	19
○ <i>Hidratación de muestras</i>	19
4.3 Análisis estadístico	19
CAPITULO V. RESULTADOS	21
5.1 Variación de la retención de la humedad por efecto del contenido de arcilla y materia orgánica nativa 21	
• Evaluación del efecto de la arcilla sobre la retención de humedad por el suelo	21
• Cambio de la retención de la humedad como función de la concentración de la materia orgánica nativa en suelos arcillosos	25
5.2 Variación de la retención de la humedad por efecto del material orgánico aplicado	31
• Disminución de la humedad retenida como consecuencia de la adición de turba en suelos arcillosos.....	31
• Comparación de los cambios en la humedad retenida en compost y turba, como ejemplo de materiales orgánicos de uso frecuente en el medio agrícola.....	37
• Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de alfalfa como material orgánico.....	44
• Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de paja de avena como material orgánico	50
• Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de turba como material orgánico.....	57
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	64
CAPITULO VII. LITERATURA CITADA	65

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Muestras empleadas para la comprobación del efecto de la materia orgánica nativa (M_O) y las arcillas sobre la retención de humedad.	15
Cuadro 4.2. Diseño experimental para la comprobación del efecto de la materia orgánica nativa (M_O) y las arcillas sobre la capacidad de retención de humedad.	15
Cuadro 5.1. Disminución de la humedad (en gramos y %) en muestras de suelo con diferente concentración de arcilla (A), con el contenido de materia orgánica nativa intacta (M_{O_i}) y eliminada por oxidación ($M_{O_{ox}}$) por adición de H_2O_2 a $50^\circ C$ de temperatura constante.	21
Cuadro 5.2. ANAVA del efecto de las arcillas (A) y la materia orgánica nativa (M_{O_i}) de las muestras de suelo sobre la capacidad de retención de humedad a temperatura constante de $50^\circ C$ a los 60 minutos	23
Cuadro 5.3. Comparación de medias para la variación de la humedad en muestras de suelo con diferente concentración de arcilla al ser sometido a $50^\circ C$ de temperatura constante por 60 minutos.	23
Cuadro 5.4. Disminución de la humedad (en gramos y %) en cuatro suelos arcillosos con diferentes contenidos de materia orgánica nativa (M_O) a $50^\circ C$ de temperatura constante.	26
Cuadro 5.5. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad retenida expresada en peso (H_G) y en porcentaje (H_P), en muestras con diferente contenido de materia orgánica nativa (M_O) en suelos arcillosos ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a $50^\circ C$ de temperatura constante.	31
Cuadro 5.6. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de turba-suelo ($M_{T.S}$) en distintas proporciones con suelos con $40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente a $50^\circ C$ de temperatura constante.	32
Cuadro 5.7. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) y porcentaje (H_P), por efecto de mezclas ($M_{T.S}$) con distinta proporción de turba y suelo.	37
Cuadro 5. 8 Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de compost y turba ($M_{C:T}$) en distintas proporciones a $50^\circ C$ de temperatura constante.	38
Cuadro 5.9. Ecuaciones de regresión de la variación del contenido de humedad en relación al tiempo para mezclas de compost y turba a una temperatura constante de $50^\circ C$. La humedad es expresada en peso (H_G) y porcentaje (H_P).	43
Cuadro 5.10. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de alfalfa y suelos ($M_{A:S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a $50^\circ C$ de temperatura constante.	44
Cuadro 5.11. Análisis de varianza de la retención de humedad de diferentes mezclas de alfalfa y suelos ($M_{A:S}$) con diferentes cantidades de materia orgánica nativa (M_O), a los 50 minutos a $50^\circ C$ de temperatura constante.	46
Cuadro 5.12. Comparación de medias para la comprobación del efecto de los diferentes niveles de alfalfa sobre la retención de humedad a $50^\circ C$ de temperatura constante.	47

Cuadro 5.13. Comparación de medias para la comprobación del efecto del contenido de materia orgánica nativa sobre la retención de humedad a 50°C de temperatura constante.	47
Cuadro 5.14 Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) y porcentaje (H_P), por efecto de distinta proporción de alfalfa (A_A) y suelo con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A).....	49
Cuadro 5.15. Ecuaciones de regresión entre la tasa de cambio (K_H) en la humedad retenida (expresada en %/min) y alfalfa (A_A) aplicada en cada mezcla ensayada, en suelos con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A).	49
Cuadro 5.16. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de paja de avena y suelo ($M_{P.S}$) que tenía distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.....	50
Cuadro 5.17. ANAVA del efecto de paja de avena y suelos ($M_{P.S}$) con distintas cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a temperatura constante de 50°C a los 50 minutos	55
Cuadro 5.18. Comparación de medias para la variación de la humedad en muestras de suelo con diferente concentración de paja de avena al ser sometidos a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.	56
Cuadro 5.19. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) por efecto de distintas proporciones de paja de avena (P_A) y suelo con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A).	57
Cuadro 5.20. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de turba y suelo ($M_{T.S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.....	57
Cuadro 5.21. ANAVA del efecto de mezclas de turba y suelo ($M_{T.S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), sobre la retención de humedad a temperatura constante de 50°C por 50 minutos.....	61
Cuadro 5.22. Comparación de medias para variación de la humedad por efecto de las diferentes concentración de turba al ser sometido a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.	61
Cuadro 5.23. Comparación de medias para la comprobación de la variación de la humedad por efecto de diferentes proporciones de turba y distinta concentración de materia orgánica nativa (M_O) al ser sometido a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.....	62
Cuadro 5.24. Comparación de la variación de la retención de humedad a diferentes proporciones de la mezcla de turba con el suelo, tomando como referencia la modificación de dicha variable observada en el suelo sin adición del material orgánico (línea sólida).	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Curvas termogravimétricas para suelos con y sin MO (en inglés OM), con dos rampas de temperaturas, la primera a 105 y la siguiente a 200 °C.	10
Figura 5.1. Tendencia de la variación del agotamiento de la humedad del suelo en función de su contenido de arcilla.	24
Figura 5.2. Tendencia entre el peso del suelo medido inmediatamente posterior a su hidratación inicial, respecto a su correspondiente contenido de arcilla.	25
Figura 5.3. Tendencia observada entre el peso del suelo medido inmediatamente posterior a su hidratación inicial, respecto a su correspondiente contenido de materia orgánica nativa (suelos con 40.3%±3.3% promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente).....	28
Figura 5.4. Efecto del contenido de materia orgánica nativa sobre la retención de humedad, representada a través del tiempo requerido para llegar a peso constante de cada muestra de suelo evaluada (suelos con 40.3%±3.3% promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente)	29
Figura 5.5. Variación de los cambios en la humedad del suelo detectados por la disminución del peso de la muestra, en suelos arcillosos con diferente contenido de materia orgánica nativa (40.3%±3.3% promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente).....	29
Figura 5.6. Variación de los cambios en la humedad del suelo en términos proporcionales que se detectaron por la disminución del peso de la muestra, en suelos arcillosos con diferente contenido de materia orgánica nativa (40.3%±3.3% promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente)	30
Figura 5.7. Variación del peso inicial como consecuencia de haber sido hidratada cada muestra. Las mezclas consisten en combinar una proporción específica de turba en un suelo arcilloso (46% de arcilla).	34
Figura 5.8. Tendencia de la relación del tiempo en que tarda la muestra en perder su humedad (peso constante), respecto a la proporción de turba presente en la mezcla en un suelo con 46% de arcilla.	35
Figura 5.9. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad (expresada en gramos) en las diferentes mezclas evaluadas de turba con suelo (46% de arcilla).....	36
Figura 5.10. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad (expresada en porcentaje) en las diferentes mezclas evaluadas de turba con suelo (46% de arcilla).	36
Figura 5.11. Mezcla compost: turba. Efecto sobre la hidratación inicial a distintas proporciones de las distintas mezclas preparadas.	41
Figura 5.12. Mezcla compost: turba. Tiempo requerido para alcanzar una deshidratación completa del material orgánico según la composición en la proporción de cada componente de las mezclas estudiadas.....	42
Figura 5.13. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad en las diferentes mezclas evaluadas. La proporción de compost: turba de cada caso se indica entre paréntesis.	43

Figura 5.14. Relación entre el peso de hidratación inicial de la mezcla con alfalfa (AA) aplicada (expresada en porcentaje del peso total de la mezcla) y el contenido de materia orgánica nativa del suelo.48

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

La capacidad de almacenamiento de agua por el suelo es clave en la producción de los cultivos agrícolas, ya que, de acuerdo a esta variable, el suelo es capaz de suministrar oportunamente agua a las plantas para que puedan cubrir su demanda evapotranspirativa. Si la capacidad de retención del suelo se incrementa, entonces el suelo podría cubrir la demanda evapotranspirativa de los cultivos por mayor tiempo, por consecuencia no se tendría la necesidad de hacer mayor uso de agua de riego y se ahorraría volúmenes importantes, en condiciones de secano este ahorro y suministro oportuno de agua afectaría positivamente la productividad agrícola. Por lo anterior, resulta de interés proponer prácticas de manejo que aumenten o al menos mantengan la retención de humedad en el suelo y para evaluarlas, se tiene como alternativa promisorias el uso de la termogravimetría (T_G).

En la literatura internacional existen numerosos métodos para evaluar la humedad del suelo, donde en los años más recientes a la fecha se ha incrementado el interés del empleo de las técnicas apoyadas en la T_G , la cual se basa en la tendencia descrita por el cambio de masa de la muestra de suelo como consecuencia de la inducción de calor, ya sea de manera constante (condiciones isotérmicas) o mediante el aumento gradual del calor aplicado (condiciones no isotérmicas), pero en todos los casos, entre sus principios está la variación inversa de la masa de la muestra respecto al tiempo que se ha sometido a una temperatura dada, cuya ventaja está en la exactitud y rapidez de la medición, indistintamente del procedimiento elegido.

Los trabajos relacionados con este tema son numerosos, donde se ha probado la influencia de diversas propiedades y características de los suelos sobre la retención de humedad; sin embargo, la variabilidad constante del agua en el sentido horizontal, vertical y a través del tiempo no ha sido posible considerarla convenientemente por los procedimientos que se solían emplear para su medición y por ende, no han permitido que los estudios hayan sido totalmente concluyentes al tratar de cuantificar los efectos de las variables que se hubiesen evaluado. Por lo anterior, el propósito de la presente investigación fue cuantificar el efecto de la arcilla y la materia orgánica nativa sobre la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, así como su cambio como consecuencia de la adición de diversos materiales orgánicos, que en este caso fueron turba, compost, paja de avena y paja de alfalfa en diferentes dosis.

CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Calidad del suelo

La calidad del suelo visto desde la producción agrícola puede entenderse como la suma de indicadores (materia orgánica, profundidad de la capa arable, infiltración, agregación, pH, salinidad, contaminantes, respiración del suelo, etc.) que en conjunto tienen como fin último proveer condiciones adecuadas a los cultivos para su correcta producción. El mantenimiento de la calidad del suelo tiene por objetivo la sostenibilidad ambiental, es por eso que la evaluación del impacto de las prácticas de la gestión del suelo sobre sus indicadores de calidad nos permite monitorear los cambios y determinar la tendencia en la mejora o deterioro de la calidad del suelo (Arshad y Martin, 2002).

- **Humedad del suelo**

Uno de los indicadores más importantes del suelo es el contenido de humedad, ya que el uso adecuado del agua permitirá el desarrollo sostenible y alimentación de la creciente población a nivel mundial (Arshad y Martin, 2002). De acuerdo a Smith *et al.*, (2000) el término contenido de agua en el suelo se define como el agua que puede ser evaporada de un suelo al calentarse a una temperatura de 105 °C hasta que la muestra alcance peso constante. El agua está presente en el suelo como vapor y en forma líquida, por lo que las moléculas del agua pueden estar adsorbidas en la superficie de los materiales coloidales, en particular en las arcillas y moléculas con grupos hidroxilos. El agua del suelo se clasifica como agua unida y agua libre, el agua unida a la superficie de las partículas coloidales del suelo difiere en sus propiedades y estructuras al agua libre, ya que el agua unida se encuentra en la doble capa eléctrica de las arcillas, ésta se puede clasificar como fuertemente unida y débilmente unida, el agua libre se encuentra fuera de la doble capa eléctrica y se clasifica como agua capilar y agua gravimétrica (Whitlow, 1993).

Los estudios sobre el contenido de agua en los suelos se pueden clasificar en dos categorías: (1) determinación de los tipos y contenido del agua unida en la superficie del suelo y (2) estudios sobre las propiedades físicas y químicas del agua unida (Yan-Long, *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista agronómico la humedad del suelo se refiere a el agua disponible en el suelo que puede ser usado por las plantas, esta humedad se encuentra caracterizada por los índices de humedad del suelo. Los índices de humedad del suelo son una medida del total de agua almacenada para la planta que varía de 0 a 1, se puede expresar en términos relativos (m^3/m^3 o mm/mm), también en términos absolutos (profundidad de agua en mm o masa en kg) y en potencial (tención del suelo o succión matricial del suelo (Saturación θ_{SAT} , capacidad de campo θ_{FC} , y punto de marchitez permanente θ_{WILT}) (Seneviratne *et al.*, 2010).

- **Importancia de la humedad del suelo**

La humedad del suelo juega un papel importante en el balance energético de la superficie de la tierra, ya que puede controlar el flujo de calor latente, teniendo implicaciones en el suministro del agua y en la producción de cultivos y de sus rendimientos (Balaeva, *et al.*, 2017). A nivel global uno de los principales retos que enfrenta la agricultura es la escasez del agua, por la contaminación y por el incremento en la demanda (Rosegrant y Cline, 2003). La pérdida de humedad del suelo provoca un incremento en la retención del agua por la matriz del suelo, lo que genera menor disponibilidad de agua para las plantas (Seneviratne *et al.*, 2010). La pérdida de humedad produce una baja en la cantidad de agua disponible en el suelo por lo cual se reducen los rendimientos a causa de un menor volumen de agua usado para la transpiración (Padovan *et al.*, 2018). Una de las primeras reacciones de las plantas ante el estrés hídrico es detener el desarrollo de la parte aérea y gastar sus recursos en el desarrollo de sus raíces con la finalidad de explorar mayor volumen del suelo y poder aprovechar el agua existente (Tenhaken, 2015).

- **Retención de humedad de los suelos por efecto de la materia orgánica**

El contenido de humedad disponible durante el periodo de sequía está influenciado por las especies de plantas, características del sustrato y las condiciones del clima (Berretta, *et al.*, 2014), sin embargo, la materia orgánica puede incrementar el poder de retención de humedad del suelo mediante cambios en su estructura gracias a la formación de macro y micro agregados, los micro y macro agregados del suelo juegan también un papel importante en la retención de humedad ya que contribuyen a mejorar la porosidad y estructura del suelo (Totsche *et al.*, 2018), los agregados también reciben el nombre de compuestos organo-mineral (Kleber, *et al.*, 2007). La materia

orgánica contribuye a la funcionalidad y sustentabilidades del suelo, ya que posee una alta capacidad de absorción de agua, pero en diferente magnitud de acuerdo a cada tipo de suelo, ya que las arcillas, limos y arenas finas poseen una importante capacidad de retención de agua, en especial las arcillas 2:1 ya que poseen características fisicoquímicas muy diferentes a los limos y arenas y en ocasiones el efecto de estos minerales enmascaran el efecto de la MO (Murphy, 2015). La materia orgánica del suelo (MOS), se define como la suma de todos los materiales orgánicos de origen natural presentes (Baldock y Broos, 2011), para considerarse como MOS se requiere que los materiales orgánicos estén presentes en formas reactivas móviles, es decir, que no sean reconocibles bajo un microscopio óptico.

La aplicación de un compost a dosis de 27 tonha⁻¹ por 3 años en los primeros 25 cm de un suelo arenoso tuvo como resultado la mejora de su estructura, incremento de su contenido de MO, mejora de la infiltración, reducción de la erosión, reducción de la compactación (Aranyos, *et al.*, 2016) y también se ha demostrado como la aplicación de compost incrementa los nutrientes y la capacidad de retención de humedad del suelo (Celik, *et al.*, 2004). En un trabajo más reciente se comparó el efecto de la aplicación de compost sobre la capacidad de almacenamiento del suelo y se observó que se mejoró significativamente la retención de humedad en parcelas tratadas con compost (Ramos, 2017). La aplicación de compost en suelos salino sódicos también ha tenido como resultado un incremento considerable en la capacidad de retención de humedad del suelo (Emami y Astarai, 2012).

Otro material utilizado en algunas partes del mundo es la turba, por ejemplo, en suelos arenosos boreales de Cánada se han realizado aplicaciones de turba en los cuales se ha visto un incremento en la capacidad de almacenamiento del agua e incremento de la materia orgánica del suelo (Li, *et al.*, 2004). También la turba mostró efectos positivos en la retención de humedad en suelos de dunas de arena para el establecimiento de leguminosas con fines de recuperación, en los cuales la aplicación de la turba tuvo como beneficio un incremento de la capacidad de almacenamiento de la humedad que se tradujo en una mayor capacidad de establecimiento de leguminosas (Aschenbach *et al.*, 2012).

La paja de los cereales son otra fuente de materia importante, pues, en lugares con baja precipitación ha demostrado contribuir a la conservación de humedad para los cultivos cuando es usada como acolchado (Hu *et al.*, 2018). En algunas zonas productoras de cereales la paja producto de las cosechas se ha usado para incorporarse al suelo de forma homogénea pulverizándola con la finalidad de mejorar las propiedades físicas del suelo como la retención de humedad, infiltración estructuración y como consecuencia incrementa el rendimiento de los cultivos (Sinica, 2018).

Lohr y Pearson-Mims, (2001) encontraron que el uso de acolchados superficiales con turba reduce la evapotranspiración (ET) en plantas cultivadas en contenedores y por otro lado, en otro experimento Ordóñez *et al.*, (2018) concluyen que ninguno de sus tratamientos de acolchado con diferentes fibras orgánicas redujo el consumo de agua, esto probablemente porque el mayor consumo del agua se debe al efecto de la transpiración; esto concuerda con otros resultados encontrados por Altland y Lanthier, (2007), que también indican que la transpiración es el principal factor de pérdida de agua del sistema suelo-planta en plantas cultivadas en contenedores.

Las coberturas del suelo interceptan a la lluvia y evitan que impacte al suelo, mejorando así la infiltración y reducen la erosión hídrica, de este modo se genera mayor disponibilidad de humedad en el suelo, después reduce la tasa de evaporación del agua del suelo al tener una función de barrera a los rayos solares, (Seneviratne *et al.*, 2010).

Otra alternativa es el uso de enmiendas orgánicas en el suelo para incrementar la retención de humedad, tal es el caso del trabajo realizado por (Leu *et al.*, 2010) en el que analizó el efecto de la aplicación creciente dosis de materiales orgánicos en el incremento de la retención de humedad de tres clases de suelos distintos; sus resultados fueron que los incrementos en las dosis de materiales orgánicos mejoraron el almacenamiento y retención de agua en tres tipos de suelos.

Estas mejoras en las propiedades del suelo por efecto de la materia orgánica se traducen en una reducción de la cantidad y frecuencia del riego ya que la materia orgánica del suelo (MOS) es un parámetro clave que determina calidad, productividad y funcional ecológica del suelo (Kučerík *et al.*, 2018).

- **Pérdida de la humedad del suelo**

Las principales pérdidas del agua de los suelos suceden por evapotranspiración (ET) (Altland y Lanthier, 2007). Las coberturas del suelo se han utilizado con éxito con la finalidad de conservar la humedad, reducir la erosión e incrementar los rendimientos en zonas de baja precipitación; se ha utilizado diversos tipos de coberturas o acolchados como, grava, rocas, cortezas, residuos de cosechas y acolchados sintéticos (Amoroso, *et al.*, 2010);

Las coberturas del suelo interceptan a la lluvia y evitan que impacte al suelo, mejorando así la infiltración y reducen la erosión hídrica, de este modo se genera mayor disponibilidad de humedad en el suelo, después reducen la tasa de evaporación del agua del suelo al tener una función de barrera a los rayos solares, (Seneviratne *et al.*, 2010). En la producción de café, los árboles usados para sombra y la hojarasca acumulada, protegen al suelo evitando el impacto directo de los rayos solares, reduciendo de esta manera la evaporación (Padovan *et al.*, 2018).

Las mejoras en las propiedades del suelo por efecto de la materia orgánica se traducen en una reducción de la cantidad y frecuencia del riego ya que la (MOS) es un parámetro clave que determina calidad, productividad y función ecológica del suelo (Kučerik *et al.*, 2018).

- **Manejos para conservar la humedad**

La labranza es una actividad importante previa a la siembra que permite incrementar la densidad aparente del suelo, mejora la distribución de agregados, incrementa la porosidad, la infiltración, drenaje y almacenamiento de agua para proveer las condiciones propicias para la germinación y establecimientos de cultivos, sin embargo, se debe tener en cuenta que para que esto se logre se requiere de agentes aglutinantes como el carbono orgánico del suelo, las raíces y de las hifas de los hongos (Totsche *et al.*, 2018). Una forma de agregar al suelo carbono orgánico es a través de la aplicación de enmiendas orgánicas como el compost que, además proporciona nutrientes al suelo, la materia orgánica del compost debe estar correctamente procesada para alcanzar un buen nivel de estabilidad para evitar fitotoxicidades, desbalance de nutrientes y pérdida de nitrógeno y carbono (Dell'Abate *et al.*, 2000).

Diversas son las estrategias que se realizan para la conservación de la humedad del suelo, por ejemplo uso de maya sombra, uso de acolchados de diferentes materiales y a aplicación de materia orgánica al suelo genera un incremento en la capacidad de retención de humedad de los suelos (Leu, *et al.*, 2010). En plantaciones de café se han utilizado con éxito árboles para sombra y la acumulación de hojarasca (Padovan *et al.*, 2018).

2.2 Determinación de humedad del suelo

- **Problemática**

La humedad varía de forma temporal y espacial por lo que en extensiones grandes (>100 km²) la medición in situ no es posible; como alternativa a esta situación se han utilizado métodos que implican el uso de sensores satelitales, sin embargo los sensores poseen una limitada resolución espacio temporal (Brocca *et al.*, 2012). Existen trabajos que se han realizado con la finalidad de mejorar estos modelos al combinar las observaciones locales y correlacionarlas de forma espacial con las observaciones de los sensores, pero su uso es complicado por la cantidad de información requerida. Otro método alternativo usado en la medición de humedad del suelo en largas extensiones es el uso de simulaciones de modelos numéricos, pero una de las desventajas es que, si no se cuenta con suficiente información y de buena calidad los resultados de las simulaciones no podrán estimar la humedad real del suelo, sin embargo, los modelos si son capaces de reproducir anomalías y variabilidad estacional (Entin *et al.*, 2000) y (Guo y Dirmeyer, 2006).

- **Métodos para la determinación de humedad**

Dentro de los métodos más utilizados para la determinación de humedad del suelo se pueden mencionar el método crioscópico, el método del calorímetro, el método de centrifugación, el método dilatométrico, el método de capacidad de calor, la difracción de rayos X, el método de análisis térmico diferencial (DTA), la calorimetría isotérmica, la técnica de resonancia magnética nuclear y el método de reflectometría en el dominio del tiempo (Wang, *et al.*, 2011). Los métodos de análisis térmico pertenecen a las familias de técnicas que usan calor para medir las propiedades del suelo, las dos más utilizadas en la termogravimetría (TG), la cual se basa en los cambios de masa del suelo en condiciones isotérmicas o no isotérmicas y la calorimetría (isotérmica y no isotérmica), que se basa en la medición de la temperatura de la entalpia del instrumento utilizado.

La T_G proporciona información cuantitativa (pérdida de masa) y cualitativa (temperatura) debido al calentamiento de acuerdo a la temperatura de escaneo (Kučerík, *et al.*, 2018).

- **Método termogravimétrico (T_G)**

La Confederación Internacional para el Análisis Térmico y la Calorimetría (ICTAC) define el análisis térmico como un grupo de técnicas en las que una propiedad física o química de una muestra se controla contra el tiempo o la temperatura, mientras que la temperatura de la muestra, en una atmósfera específica, es programada (Langier-Kuźniarowa, 2002). En palabras más sencillas la técnica T_G se basa en la medición del peso de una muestra en función de la temperatura, la muestra es colocada en una termobalanza de alta precisión dentro de un horno y el peso se reporta en tiempo real durante el tiempo del análisis.

Esta técnica ha sido ampliamente usada, sus inicios son desde 1887, pero no fue hasta finales de la década de 1930 cuando esta técnica tuvo su principal desarrollo en estudios de mineralogía. Durante gran parte del desarrollo de esta técnica, su uso principal fue en estudios de minerales dejando a un lado a los componentes orgánicos, pues se creía que el efecto de estos podría enmascarar los efectos de los minerales. En los últimos años del desarrollo de esta técnica, se ha aceptado que la estabilidad térmica de cualquier material está relacionada con su química y propiedades de su superficie y por lo tanto se ha realizado estudios para probar si la estabilidad térmica de la MOS puede servir para un aproximado de la estabilidad biogeoquímica, por lo cual se ha investigado la energía de la interacción entre la MOS y los minerales del suelo (Plante *et al.*, 2009).

Dentro de las técnicas T_G existen algunas variaciones para otros fines, por ejemplo, el análisis térmico diferencial (ATD), es una técnica que mide la diferencia de temperatura utilizando una sustancia y un material de referencia inerte a través del tiempo; La calorimetría diferencial de barrido (CDB), es una técnica para medir la energía agregada a una muestra y referencia en función a la temperatura; El análisis de gases evolucionados es una técnica de acoplamiento, es decir los productos de las reacciones térmicas son medidos con otros detectores que se han incorporado por ejemplo, la espectrometría de infrarrojo transformado de Fourier (EITF), cromatografía de gases (CG), espectrometría de masas (SM) y espectrometría de masas de

reacción isotópica (EMRI) (Plante *et al.*, 2009).

La humedad del suelo se puede medir mediante el método de la termogravimetría (T_G), la cual ha sido utilizado con éxito (Barros, *et al.*, 2007). Las principales razones por lo que se recomienda el uso de este método es porque es bastante económico, se requiere poca preparación de la muestra, es rápida, sus resultados son reproducibles y son ricos en información, ya que se ha demostrado que los resultados de los análisis térmicos están fuertemente correlacionados con una serie de propiedades fundamentales del suelo (Siewert, 2004).

El agua del suelo determinado usando el método convencional de secado en horno, es decir a una temperatura de 105°C durante 24 horas, se define como agua unida libremente, el agua libremente unida se puede calcular con T_G a 105°C por 90 minutos (Wang *et al.*, 2011). Su exactitud depende del número de muestras tomadas y de la destreza y manejo de dichas muestras (Aguilera y Martínez, 1990).

Es común expresar el contenido de agua del suelo como una fracción gravimétrica (ω), es decir, como la razón de la masa del agua ($M\omega$) y la masa del suelo seco (M_s), también se suele expresar el contenido de agua como una fracción volumétrica (θ), es decir, como la razón del volumen de agua ($V\omega$) y el volumen total del suelo (V_t) en estudios de infiltración.

- **Estudios previos**

Costa *et al.*, (2004) estudiaron el efecto de las diferentes arcillas sobre la capacidad de retención de humedad del suelo con la técnica T_G . Los resultados encontrados fueron que las arcilla tipo 2:1 tuvieron mayor capacidad de retención de humedad a diferencia de las de tipo 1:1, estos resultados se correlacionan con las áreas superficiales de estos minerales. Las determinaciones de humedad realizadas mediante el método T_G fueron precisas y relativamente fáciles de obtener, por lo que el autor de este trabajo recomienda el uso de este método.

Saxton y Rawls, (2006) realizaron una serie de correlaciones entre la retención de humedad del suelo y contenidos de arena, limo, arcilla y MOS con la finalidad de generar ecuaciones que

permitan predecir con exactitud este parámetro sin necesidad de realizar todo el procedimiento convencional ya que es complicado, tardado y costoso. Las ecuaciones resultantes fueron probadas con tres conjuntos de datos independientes con la finalidad de evaluar su capacidad predictiva, los resultados fueron cuatro ecuaciones que muestran una adecuada correlación entre valores de humedad del suelo y las arenas, gravas, arcillas y la MOS por lo cual se demuestra que estas variables del suelo ejercen efectos sobre la humedad del suelo.

Wang *et al.*, (2011) realizaron con T_G un estudio con la finalidad de determinar la influencia de las arcillas y la MOS sobre la retención de humedad, los resultados que obtuvieron fueron: En el experimento de las muestras sin MOS el suelo con 7% de arcilla presentó una curva TG casi plana, el suelo con 43% de arcilla presentó una curva TG pronunciada y el suelo con 16% presentó una curva de pendiente media entre las dos anteriores (Figura 2.1).

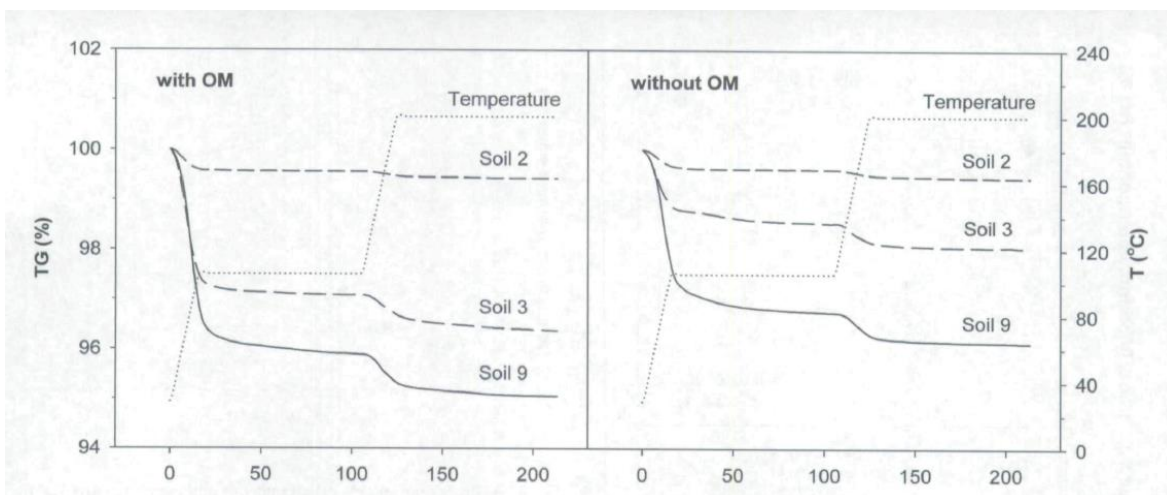


Figura 2.1. Curvas termogravimétricas para suelos con y sin MO (en inglés OM), con dos rampas de temperaturas, la primera a 105 y la siguiente a 200 °C.

Estos resultados son concordantes con el área superficial de cada muestra, por lo que concluyeron que la textura del suelo es el factor clave que determina la capacidad de absorción de agua del suelo. Las pérdidas de peso de las muestras con MOS fueron menores como se esperaba, lo que indica que la materia orgánica ejerce un efecto importante en la retención de humedad sobre la superficie sólida. Otro hallazgo importante es que el agua poco ligada constituye el 80% del total del agua del suelo y el resto pertenece al agua medianamente ligada que se libera con temperaturas de 200°C.

El agua en la superficie del suelo se mantiene mediante fuerzas superficiales de Van der Waals, enlaces de hidrógenos a la superficie sólida del suelo y fuerzas de cohesión mediante moléculas adyacentes. El contenido de agua ligada de manera flexible está significativamente relacionado con área superficial (As). El coeficiente de correlación es 0.906 para las muestras originales y 0.832 para las muestras eliminadas por OM. El contenido de agua estrechamente unido también tiene una correlación positiva con AS, pero el coeficiente de correlación es significativo al 5% solo en muestras eliminadas de OM.

CAPITULO III. OBJETIVOS E HIPOTESIS

3.1 Objetivos

- Objetivo general

Evaluar por termogravimetría la tasa de disminución de la humedad en suelos con diferente contenido de arcilla y materia orgánica nativa, así como el efecto de enmiendas orgánicas como turba, compost, paja de avena y de alfalfa, sobre la capacidad de retención de humedad en el medio edáfico.

- Objetivo específico 1

Cuantificar la tasa de disminución de humedad en suelos con diferentes contenidos de arcilla y materia orgánica nativa

- Objetivo específico 2

Evaluar el efecto de la incorporación de enmiendas orgánicas al suelo (turba, compost, paja de avena y de alfalfa) sobre la capacidad de retención de humedad del medio edáfico

3.2 Hipótesis

- Hipótesis 1

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo varía de manera directa y proporcional al contenido de arcilla y de materia orgánica nativa del suelo

- Hipótesis 2

La retención de humedad del suelo se favorece por efecto de los tipos y cantidades de materiales orgánicos aplicados

CAPITULO IV. MATERIALES Y METODOS

- **Área de estudio**

El trabajo se realizó durante los períodos de Primavera, Verano y Otoño de 2018 en el Laboratorio de Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (RASPA) del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y en el Laboratorio de Ingeniería de Riego del Campo Experimental “Tlapeaxco” del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, los suelos utilizados fueron colectados en el distrito de riego 043 de Nayarit en el 2017.

- **Determinación de la humedad**

Las mediciones del contenido de humedad de las muestras de los suelos se realizaron con la técnica termogravimetría (T_G) con una balanza termogravimétrica OHAUS NB-35. La temperatura a la cual se realizaron las mediciones de humedad fue a 50°C , y el peso se tomó a cada 10 minutos hasta que las muestras alcanzaron peso constante. Con los resultados obtenidos en cada experimento se realizó una gráfica con los valores extremos para conocer las tendencias y se definió el tiempo para realizar la comparación estadística de los resultados de humedad para todas las muestras en un solo tiempo.

- **Técnica**

Como el trabajo de investigación se basa en el estudio del contenido de agua del suelo que las plantas pueden aprovechar y en base a información de estudios previos sobre los tipos de agua almacenados en el suelo y a su temperatura de extracción se eligió como temperatura de análisis 50°C . Las muestras de suelo para cada experimento se prepararon, hidrataron y se colocaron en charolas de aluminio y se pusieron en el horno del analizador en donde se realizaron las mediciones de humedad a cada 10 minutos. El analizador fue programado a temperatura constante de 50°C y se eligió el programa automático para finalizar el análisis cuando llegara a peso constante. La humedad de cada muestra se calculó de la siguiente manera:

$$4 \quad H = \left(\frac{P_{st} - P_{ss}}{P_{s0} - P_{ss}} \right) 100$$

H=Humedad en %

P_{st}=Peso del suelo húmedo en el tiempo t

P_{s0}=Peso del suelo húmedo en el tiempo 0

Pss=Peso del suelo seco

4.1. Variación de la retención de la humedad por efecto del contenido de arcilla

- Evaluación del efecto de la arcilla sobre la retención de humedad por el suelo
 - *Preparación de las muestras de suelo*

Las muestras de los suelos utilizados fueron secados a la sombra y tamizados con malla 20, se pesaron 7.5 g con una balanza analítica de precisión Oriba y se colocaron en tubos de plástico con tapas y se etiquetaron para su posterior uso.

- *Oxidación de la materia orgánica (MO)*

La oxidación de la MO se realizó colocando las muestras de suelo en vasos de precipitado de un litro, se calentaron a 60 °C una plancha de calor y se le agregó constantemente peróxido de hidrógeno al 30% hasta que la adición de peróxido dejó de provocar reacción en las muestras, posteriormente las muestra se secaron en una estufa de ventilación forzada a 110 °C por 24 h.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras de cada tratamiento se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del tiempo de reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

- *Diseño experimental*

Se utilizaron cinco muestras de suelos con diferentes contenidos de arcilla y materia orgánica nativa (M_O), los cuales se presentan en el Cuadro 4.1. El diseño experimental que se eligió tuvo como bloques a los suelos evaluados mientras que los tratamientos fueron dos, esto es, los suelos que quedaron con la M_O intacta y a los que se les “eliminó” por oxidación a través de la aplicación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.1. Muestras empleadas para la comprobación del efecto de la materia orgánica nativa (M_O) y las arcillas sobre la retención de humedad.

Muestra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	Mo
1	85	6	9	Arena	0.3
2	59	24	17	Franco arenoso	2.0
3	41	40	19	Franco	6
4	31	38	31	Franco arcilloso	8
5	1	20	79	Arcilloso	4

Cuadro 4.2. Diseño experimental para la comprobación del efecto de la materia orgánica nativa (M_O) y las arcillas sobre la capacidad de retención de humedad.

Fuentes de variación	T1					T2				
Tratamiento	Con oxidación de Mo					Sin oxidación de Mo				
Bloque	B1	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B3	B4	B5
Arcilla (%)	9	17	19	31	79	9	17	19	31	79

- Cambio de la retención de la humedad como función de la concentración de la materia orgánica nativa en suelos arcillosos
 - *Preparación de las muestras de suelo*

Las muestras de los suelos utilizados fueron secados a la sombra y tamizados con malla 20, se pesaron 10 g con una balanza analítica de precisión Oriba y se colocaron en tubos de plástico con tapas y se etiquetaron para su posterior uso.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras de los suelos se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron

reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del tiempo de reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

4.2. Variación de la retención de la humedad por efecto del material orgánico aplicado

- Disminución de la humedad retenida como consecuencia de la adición de turba en suelos arcillosos
 - *Preparación de las muestras de suelo*

Las muestras de suelos utilizados fueron secadas a la sombra y tamizados con malla 20, se pesaron con una balanza analítica de precisión y se formaron muestras de 10 g. Las muestras se colocaron en tubos de plástico con tapas y se etiquetaron de acuerdo a cada diseño experimental en los cuales se realizaron las mezclas para cada diseño.

- *Preparación de la muestra de turba*

La muestra de turba se secó a la sombra por tres días y se tamizó con un tamiz malla 10 y las muestras para cada nivel se pesaron con una balanza analítica de precisión de acuerdo al diseño experimental, se agregaron a los tubos de plástico en donde se encontraban las muestras del suelo de cada experimento.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras de cada tratamiento se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

- Comparación de los cambios en la humedad retenida en compost y turba, como ejemplo de materiales orgánicos de uso frecuente en el medio agrícola
 - *Preparación de las muestras de compost y turba*

Ambos materiales orgánicos fueron secados previamente en la sombra y tamizados con un tamiz malla 20 y se pesaron con una balanza analítica de precisión Oriba y colocaron en los tubos de plástico con tapa para formar cada mezcla de acuerdo al diseño experimental.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras de cada tratamiento se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

- Cambios en el contenido de humedad en función de la materia orgánica nativa y la aplicación de alfalfa como material orgánico
 - *Preparación de las muestras de los materiales orgánicos*

Las muestras de alfalfa se secaron en una estufa de ventilación forzada a 60 °C por dos días y luego se molieron y pasaron por un tamiz malla 10. Las muestras fueron pesadas y agregadas a los tubos de plástico en donde se encontraban las muestras del suelo de acuerdo al diseño experimental de cada experimento para preparar cada combinación.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

- *Diseño experimental*

Se estudió el efecto de cinco proporciones de alfalfa aplicadas al suelo, razón por la cual el diseño experimental consistió en bloques distribuidos totalmente al azar que incluyen como tratamientos a las cinco proporciones de alfalfa, ya sea previamente incubados o sin someterlas a dicho proceso.

- Cambios en el contenido de humedad en función de la materia orgánica nativa y la aplicación de paja de avena como material orgánico

- *Preparación de las muestras de suelos*

Se utilizaron 3 muestras de suelos con diferentes % de arcilla con los cuales se probaron cinco dosis de paja y dos tratamientos. El diseño experimental se conformó por los bloques que fueron las cinco dosis de paja y los tratamientos fueron con incubación o sin incubación.

- *Preparación de las muestras de los materiales orgánicos*

Las muestras de paja se secaron en una estufa de ventilación forzada a 60 °C por dos días y luego se molieron y pasaron por un tamiz malla 10. Las muestras fueron pesadas y agregadas a los tubos de plástico en donde se encontraban las muestras del suelo de acuerdo al diseño experimental de cada experimento para preparar cada combinación.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

- Cambios en el contenido de humedad en función de la materia orgánica nativa y la aplicación de turba como material orgánico

- *Preparación de las muestras de suelos*

La muestra del suelo utilizado fue secada a la sombra y tamizados con malla 20, las muestras se pesaron con una balanza analítica de precisión Oriba, y se colocaron en tubos de plástico con tapas y se etiquetó de acuerdo al diseño experimental.

- *Preparación de las muestras de compost*

Las muestras turba se secaron a la sombra por tres días y se tamizaron con un tamiz malla 10 y después se pesaron las proporciones de cada nivel de acuerdo al diseño experimental para agregarlas a los tubos de plástico.

- *Hidratación de muestras*

Las muestras de cada tratamiento se vaciaron en charolas de aluminio del analizador y se hidrataron a espejo de agua con agua destilada, las charolas fueron cubiertas con papel parafilm y se dejaron reposar por 24 horas, con la finalidad de asegurar una hidratación homogénea de la muestra, después del reposo se verificó el nivel de hidratación de cada muestra y en caso que la muestra no estaba a espejo de agua se repuso la humedad con la finalidad de asegurar que la muestra estuviera hidratada al 100%.

4.3 Análisis estadístico

En todos los casos se utilizó un diseño experimental de bloques al azar (DEBA), porque brinda la flexibilidad y precisión requeridas en esta investigación, además de que el experimento cumple con los supuestos del modelo los cuales son:

- a) Independencia
- b) Homogeneidad de varianzas
- c) Normalidad
- d) No interacción Trat*Bloq

Se realizó análisis de Varianza y una comparación de medias con el programa estadístico R versión 3.4.2. Se graficó en cada experimento los resultados extremos (muestra con mayor y

menor capacidad de retención de humedad), y para cada experimento se definió como el tiempo para el análisis estadístico aquel que le precedió a la lectura cero del extremo inferior de las tendencias extremas de humedad.

CAPITULO V. RESULTADOS

5.1 Variación de la retención de la humedad por efecto del contenido de arcilla y materia orgánica nativa

- Evaluación del efecto de la arcilla sobre la retención de humedad por el suelo

En el Cuadro 5,1 se muestran cómo afectó la oxidación de la materia orgánica nativa del suelo en cuanto a la variación de la disminución de la humedad, representada por el cambio del peso del material al aplicar de 50°C constantes durante todo el experimento.

Cuadro 5.1. Disminución de la humedad (en gramos y %) en muestras de suelo con diferente concentración de arcilla (A), con el contenido de materia orgánica nativa intacta (M_{O_i}) y eliminada por oxidación ($M_{O_{ox}}$) por adición de H_2O_2 a 50°C de temperatura constante.

T	M_{O_i}					$M_{O_{ox}}$				
	A=9%	A=17%	A=19%	A=31%	A=79%	A=9%	A=17%	A=19%	A=31%	A=79%
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)									
0	11,2	12,1	12,7	13,9	14,1	11,1	12,2	12,7	13,9	14,1
10	10,3	11,3	11,8	13,0	13,4	10,4	11,3	11,9	13,0	13,3
20	9,6	10,6	11,1	12,3	12,7	9,7	10,5	11,2	12,2	12,6
30	8,9	9,9	10,4	11,6	12,0	9,0	9,8	10,5	11,5	11,9
40	8,2	9,2	9,7	10,9	11,3	8,3	9,1	9,8	10,7	11,2
50	7,6	8,5	9,0	10,2	10,6	7,8	8,4	9,1	10,0	10,5
60	7,5	7,9	8,4	9,5	9,8	7,5	7,8	8,4	9,3	9,8
70	7,5	7,6	7,8	8,9	9,2	7,5	7,5	7,9	8,6	9,2
80	7,5	7,5	7,6	8,3	8,6	7,5	7,5	7,6	8,0	8,7
90	7,5	7,5	7,5	7,8	8,0	7,5	7,5	7,5	7,6	8,3
100	7,5	7,5	7,5	7,5	7,6	7,5	7,5	7,5	7,5	8,0
110	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,8
120	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,6

... Continúa Cuadro 5.1.

T	M _{Oi}					M _{Oox}				
	A=9%	A=17%	A=19%	A=31%	A=79%	A=9%	A=17%	A=19%	A=31%	A=79%
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)									
130	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
140	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
	Variación de la humedad retenida (porcentaje)									
0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	75,3	81,3	83,1	86,7	89,3	78,9	80,6	85,4	85,9	88,8
20	55,8	66,0	69,0	75,3	78,7	60,0	64,9	71,6	73,9	77,9
30	36,8	50,9	55,2	64,2	67,9	41,0	49,4	57,3	62,1	67,3
40	17,9	35,8	41,7	53,0	57,1	22,0	34,1	44,0	50,4	56,4
50	3,3	20,9	28,3	42,0	46,5	7,0	19,1	30,2	38,9	45,7
60	0,1	8,3	17,1	31,2	35,7	0,6	7,0	17,5	27,5	35,2
70	0,1	1,7	6,4	21,1	25,3	0,6	0,7	7,6	17,0	26,5
80	0,1	0,9	1,4	12,5	16,6	0,6	0,7	2,4	7,8	18,9
90	0,1	0,9	0,1	4,7	8,1	0,6	0,7	0,7	1,5	12,8
100	0,1	0,9	0,1	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9
110	0,1	0,9	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2

La tendencia de la disminución del contenido de humedad fue similar en todos los casos, en la que se observó una relación lineal negativa hasta el momento de llegar a peso constante, lo cual implica que en ese momento el agua del suelo se agotó. Los resultados del análisis estadístico se realizaron en el tiempo 60 minutos y los resultados se presentan a continuación.

El ANAVA realizado para el tiempo de 60 minutos (cuadro 5.2) demostró que no existen diferencias significativas (Valor $p = 0.436$) entre los tratamientos con oxidación y sin oxidación de la MO por lo que se concluye que todos los contenidos de materia orgánica de las muestras de los suelos estudiados producen el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua de las muestras, sin embargo, si se encontró diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los suelos con diferentes porcentajes de arcilla, por lo que se concluye que, no todos los porcentajes de arcilla en los suelos producen el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua.

Cuadro 5.2. ANAVA del efecto de las arcillas (A) y la materia orgánica nativa (M_{Oi}) de las muestras de suelo sobre la capacidad de retención de humedad a temperatura constante de 50°C a los 60 minutos

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr(>F)
Tratamiento	1	2.1	2.1	0.683	0.436
Bloque	1	1689.1	1689.1	544.928	6.72e-08 ***
Residual	7	21.7	3.1		

Significado del código: ‘***’ Altamente significativo ($P \leq 0.01$).

Los resultados de la comparación de medias para los bloques (suelos con diferente % de arcilla) demostró que los suelos con 79% y 31% de arcilla fueron los que retuvieron mayor humedad siendo estadísticamente iguales (Cuadro 5.3)

Cuadro 5.3. Comparación de medias para la variación de la humedad en muestras de suelo con diferente concentración de arcilla al ser sometido a 50 °C de temperatura constante por 60 minutos.

Bloque	Respuesta (gramos)	Grupo
E	35.45	a
D	29.35	a
C	17.30	b
B	7.65	c
A	0.35	d

% de arcilla de cada bloque. A (9%), B (17%), C (19%), D (31%) y E (79%)

Las concentraciones de arcilla que tuvieron un efecto estadísticamente diferentes ocurrió a valores de 19%, 17% y 9% a todos, estos resultados coinciden con el trabajo realizado por Wang *et al.*, (2011), en el cual estudiaron la capacidad de retención de humedad de tres suelos con diferente contenido de arcilla con y sin MO, encontrando que, la retención de humedad se debió principalmente por el porcentaje de arcilla de cada suelo; también encontraron que la MO del suelo contribuyen a la absorción de agua en la superficie sólida en un rango de 0.40 a 4.37% para muestras de suelo con MO, lo cual se observó también en este estudio pero el efecto se consideró nulo por no ser estadísticamente significativo al 5%.

En la Figura 5,1 se presenta de manera gráfica la relación entre contenido de arcilla de cada una de las muestras evaluadas respecto a la variación del punto final de la humedad del suelo, el cual se considera cuando en el experimento se llega al peso constante.

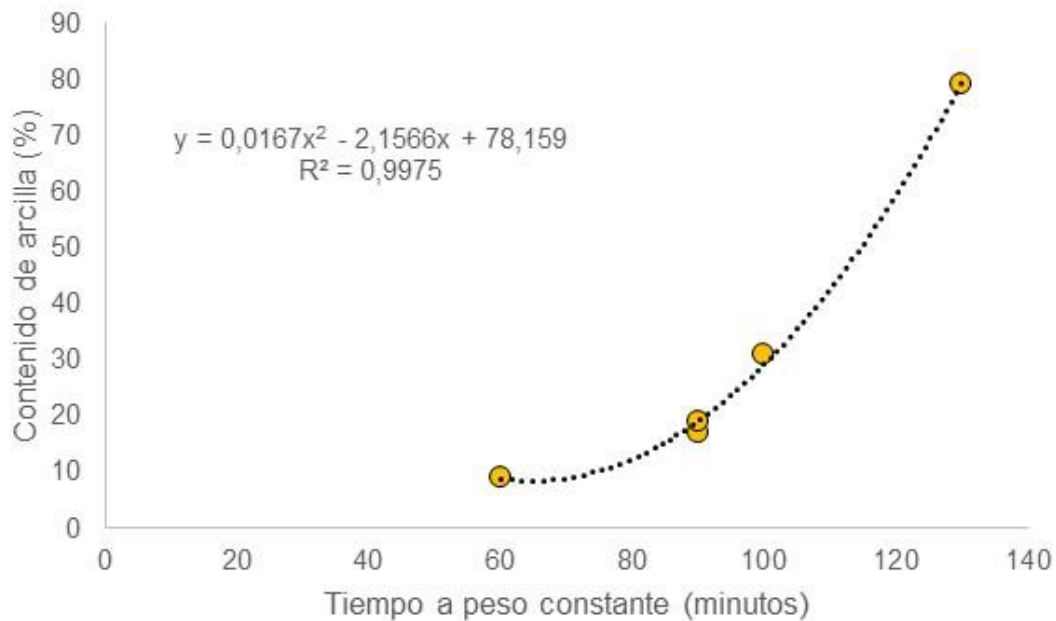


Figura 5.1. Tendencia de la variación del agotamiento de la humedad del suelo en función de su contenido de arcilla.

Con esta información experimental se hace evidente el efecto que tiene el contenido de arcilla sobre la retención de humedad, puesto que mientras más prolongado haya sido el tiempo al que llegó el estudio a peso constante implica que el material evaluado contuvo mayor cantidad de humedad. Esto se puede apreciar de manera más evidente en la Figura 5.2, en la que se presenta la tendencia entre el peso del suelo posterior a la hidratación y su correspondiente contenido de arcilla.

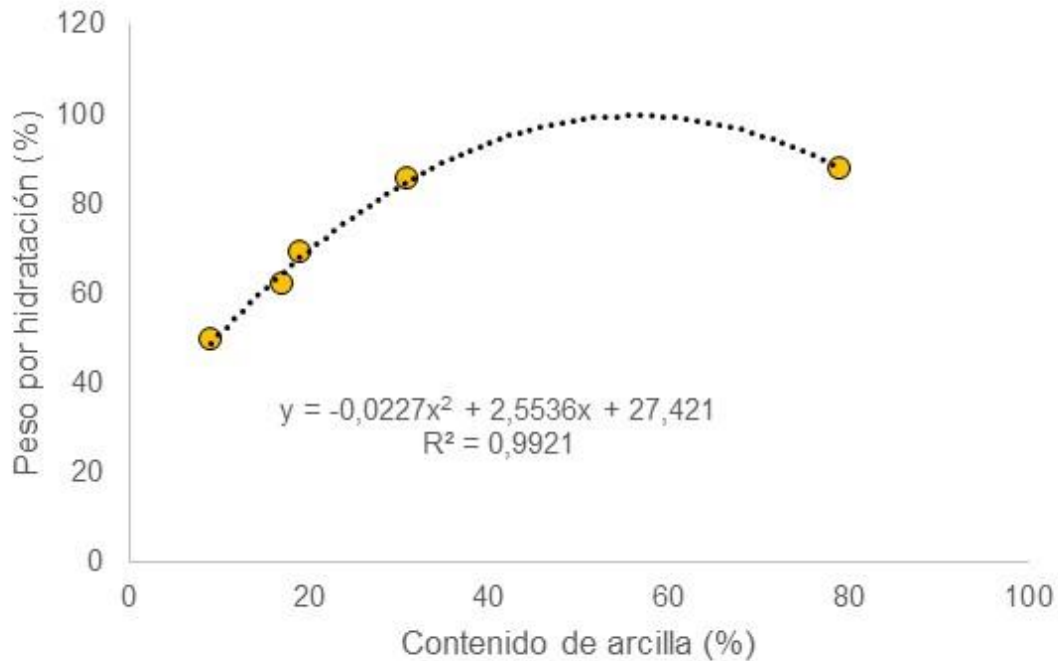


Figura 5.2. Tendencia entre el peso del suelo medido inmediatamente posterior a su hidratación inicial, respecto a su correspondiente contenido de arcilla

De acuerdo con lo observado, una vez más se hace patente el efecto que tiene el contenido de arcilla sobre la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, ya que el peso alcanzado de manera inmediata posterior a su hidratación es directamente proporcional a la concentración de su fracción fina mineral.

- Cambio de la retención de la humedad como función de la concentración de la materia orgánica nativa en suelos arcillosos

En el Cuadro 5,4 se presentan los resultados que se obtuvieron al haber sometido a las muestras a 50°C constantes, así como el efecto que tuvo esto sobre la variación de la retención de humedad en suelos arcillosos con diferente concentración de materia orgánica nativa.

Cuadro 5.4. Disminución de la humedad (en gramos y %) en cuatro suelos arcillosos con diferentes contenidos de materia orgánica nativa (M_O) a 50°C de temperatura constante.

Tiempo min	A=44% M _O =1,8%	A=36% M _O =2,5%	A=41% M _O =3,6%	A=40% M _O =4,8%
Variación de la humedad retenida (en gramos)				
0	14,8	15,0	15,8	16,9
10	14,0	14,2	15,0	16,2
20	13,3	13,5	14,3	15,5
30	12,6	12,8	13,6	14,8
40	11,9	12,1	12,9	14,1
50	11,2	11,4	12,2	13,4
60	10,5	10,8	11,6	12,7
70	10,1	10,2	10,9	12,0
80	9,9	9,9	10,4	11,4
90	9,8	9,8	10,0	10,8
100	9,7	9,7	9,8	10,3
110	9,7	9,7	9,6	10,0
120	9,7	9,7	9,6	9,8
130	9,7	9,7	9,6	9,7
140	9,7	9,7	9,6	9,6
150	9,7	9,7	9,6	9,6
Variación de la humedad retenida (porcentaje)				
0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	82,8	83,4	87,7	89,8
20	68,8	70,3	76,3	80,2
30	55,1	57,2	64,9	70,7

... Continúa Cuadro 5.4.

Tiempo min	A=44% M _O =1,8%	A=36% M _O =2,5%	A=41% M _O =3,6%	A=40% M _O =4,8%
Variación de la humedad retenida (porcentaje)				
40	41,4	44,2	53,6	61,2
50	28,0	31,4	42,3	51,8
60	15,8	19,2	31,0	42,3
70	6,7	9,0	20,7	32,9
80	2,1	2,4	11,9	23,5
90	0,2	0,2	5,5	15,4
100	0,0	0,0	1,8	8,7
110	0,0	0,0	0,0	4,2
120	0,0	0,0	0,0	1,7
130	0,0	0,0	0,0	0,5
140	0,0	0,0	0,0	0,0
150	0,0	0,0	0,0	0,0

Hay una evidente tendencia inversamente proporcional de la disminución del contenido de humedad respecto al tiempo del análisis termogravimétrico.

La relación que se observó entre el incremento del peso durante la hidratación inicial (previo al comienzo del análisis termogravimétrico), respecto al contenido de materia orgánica nativa en cada uno de los suelos estudiados se presenta en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Tendencia observada entre el peso del suelo medido inmediatamente posterior a su hidratación inicial, respecto a su correspondiente contenido de materia orgánica nativa (suelos con $40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente).

El incremento en la retención de humedad del suelo es función del contenido de materia orgánica nativa, cuya tendencia describe una función de tipo cuadrática. Si esta observación realmente es significativa, entonces debería tener una repercusión sobre el tiempo en el que llega la muestra a peso constante en el estudio termogravimétrico, puesto que como se describió previamente en esta investigación, dicho valor está asociado con la capacidad de retención de humedad. Los cambios entre dichas variables se presentan en la Figura 5.4.

La variación de los cambios en la humedad retenida por el suelo a través del tiempo se observó al aplicar 50°C de manera continua hasta que cada muestra llegó a peso constante, registrando dichos valores en gramos (Figura 5.5) y en porcentaje (Figura 5.6).

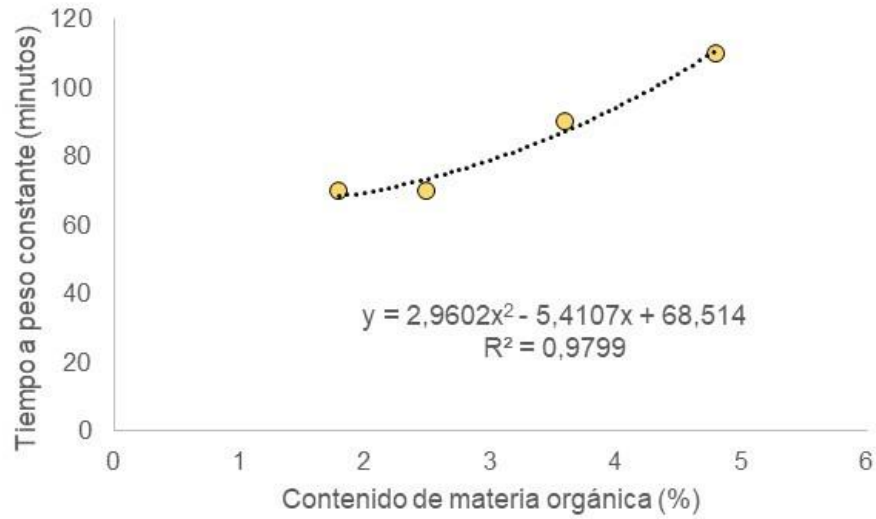


Figura 5.4. Efecto del contenido de materia orgánica nativa sobre la retención de humedad, representada a través del tiempo requerido para llegar a peso constante de cada muestra de suelo evaluada (suelos con $40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente)

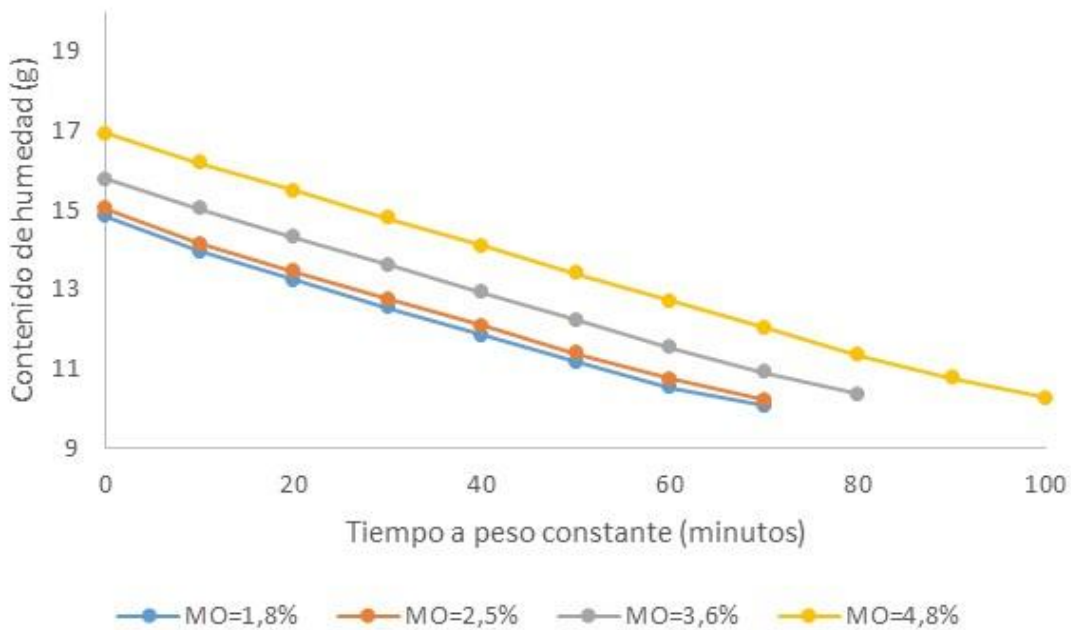


Figura 5.5. Variación de los cambios en la humedad del suelo detectados por la disminución del peso de la muestra, en suelos arcillosos con diferente contenido de materia orgánica nativa ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente)

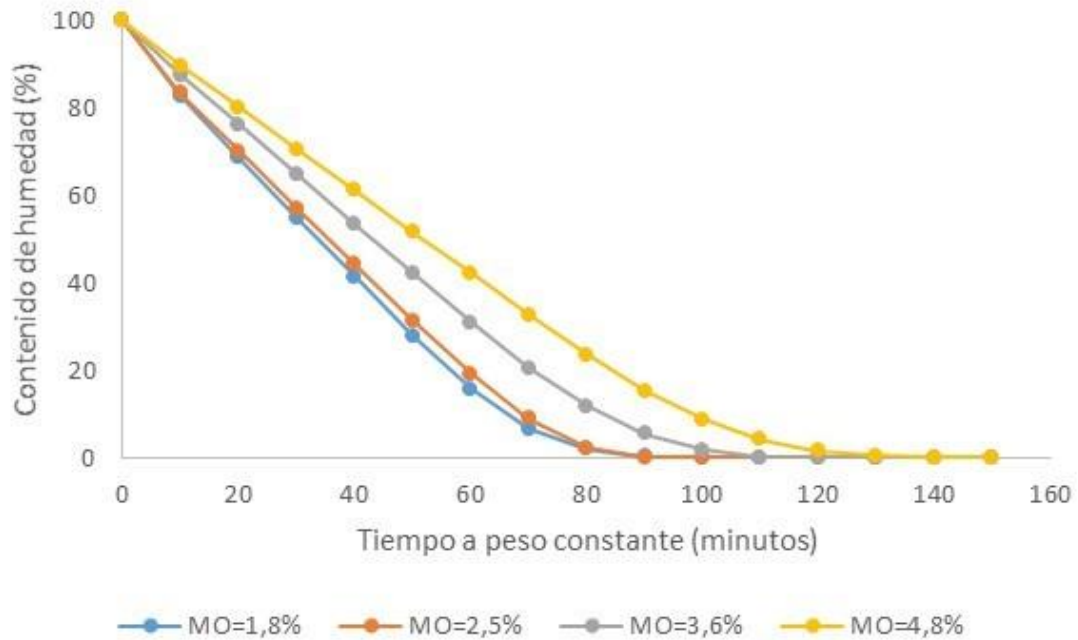


Figura 5.6. Variación de los cambios en la humedad del suelo en términos proporcionales que se detectaron por la disminución del peso de la muestra, en suelos arcillosos con diferente contenido de materia orgánica nativa ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente)

De acuerdo con lo observado en las figuras en discusión, los cambios en la humedad retenida a través del tiempo si se expresan en peso, hacen evidente que su disminución es similar entre las distintas muestras, independientemente de su concentración de materia orgánica nativa, pero no así cuando se presentan los resultados en términos proporcionales. Para cuantificar la asociación entre dichas variables se procedió a hacer un análisis de regresión, cuyas ecuaciones se presentan en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad retenida expresada en peso (H_G) y en porcentaje (H_P), en muestras con diferente contenido de materia orgánica nativa (M_O) en suelos arcillosos ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.

M_O	$H_G = f(T)$	R^2	$H_P = f(T)$	R^2
1,8%	$y = -0,064x + 14,6$	0,9863	$y = -1,34x + 96,7$	0,9954
2,5%	$y = -0,065x + 14,8$	0,9927	$y = -1,29x + 97,2$	0,9972
3,6%	$y = -0,063x + 15,5$	0,9889	$y = -1,07x + 97,7$	0,9959
4,8%	$y = -0,063x + 16,7$	0,9890	$y = -0,90x + 97,8$	0,9957

Como se previó, la tendencia entre los cambios de la humedad del suelo respecto al tiempo fue prácticamente constante, en la que se describe la ecuación que a continuación se muestra:

$$B = 0,15(M_O) - 1,64 \qquad R^2 = 0,9814$$

Donde B representa la tasa de pérdida de la humedad (g/min) y M_O es la concentración de la materia orgánica nativa de los suelos evaluados. Esto no ocurrió cuando la relación entre los cambios de la humedad respecto al tiempo se hizo al considerarlo en porcentaje. Al respecto, cabe hacer notar que las diferencias en las ecuaciones no deben centrarse en la pendiente (valor de B) sino en el intercepto, el cual señala el valor de la hidratación inicial antes de que comience el agotamiento del agua y de ahí que haya cambios en el otro grupo de ecuaciones.

5.2 Variación de la retención de la humedad por efecto del material orgánico aplicado

- Disminución de la humedad retenida como consecuencia de la adición de turba en suelos arcillosos

En el Cuadro 5.6 se muestran los resultados obtenidos durante el estudio termogravimétrico al evaluar diferentes mezclas de turba con suelo y su efecto sobre el cambio en la humedad retenida en cada caso, representada por el cambio del peso del material al aplicar de 50°C constantes durante todo el experimento.

Cuadro 5.6. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de turba-suelo ($M_{T:S}$) en distintas proporciones con suelos con $40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente a 50°C de temperatura constante.

Tiempo	$M_{T:S}=100$	$M_{T:S}=80$	$M_{T:S}=60$	$M_{T:S}=40$	$M_{T:S}=20$	$M_{T:S}=0$
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)					
0	20,0	17,0	15,7	13,6	11,5	9,3
10	19,3	16,3	15,0	12,8	10,7	8,9
20	18,5	15,5	14,2	12,1	10,0	8,6
30	17,7	14,8	13,5	11,3	9,2	8,2
40	16,9	14,1	12,7	10,6	8,5	7,8
50	16,2	13,3	12,0	9,9	7,8	7,5
60	15,4	12,6	11,2	9,2	7,1	7,1
70	14,7	11,8	10,5	8,5	6,5	6,8
80	13,9	11,1	9,8	7,8	5,8	6,4
90	13,1	10,4	9,1	7,1	5,4	6,0
100	12,4	9,7	8,5	6,5	5,0	5,7
110	11,7	9,0	7,8	6,0	4,9	5,4
120	10,9	8,4	7,2	5,5	4,8	5,2
130	10,2	7,7	6,7	5,2	4,8	5,0
140	9,5	7,2	6,2	4,9	4,8	4,9
150	8,8	6,7	5,7	4,8	4,8	4,9
160	8,2	6,2	5,3	4,7	4,8	4,9
170	7,6	5,7	5,0	4,7	4,8	4,9
180	7,0	5,3	4,8	4,7	4,8	4,9
190	6,5	5,0	4,7	4,7	4,8	4,9
200	5,9	4,7	4,6	4,7	4,8	4,9

... Continúa Cuadro 5.6.

Tiempo	M _{T:S} =100	M _{T:S} =80	M _{T:S} =60	M _{T:S} =40	M _{T:S} =20	M _{T:S} =0
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)					
210	5,5	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9
220	5,0	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
230	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
	Variación de la humedad retenida (en porcentaje)					
0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	95,3	94,1	92,9	91,2	87,9	90,6
20	90,2	88,1	86,1	82,8	77,0	82,4
30	85,2	82,3	79,4	74,5	66,1	74,7
40	80,2	76,5	72,9	66,3	55,5	66,3
50	75,3	70,4	66,3	58,2	44,9	58,3
60	70,4	64,5	59,3	50,0	34,5	50,3
70	65,5	58,5	53,3	42,1	24,5	42,4
80	60,6	52,6	46,9	34,4	15,4	34,4
90	55,7	46,9	40,6	27,1	8,2	26,5
100	50,9	41,3	34,6	20,4	2,8	18,9
110	46,1	35,9	28,9	14,3	0,4	12,1
120	41,4	30,8	23,5	9,1	0,0	6,7
130	36,8	25,9	18,6	4,8	0,0	3,3
140	32,2	21,3	14,1	1,9	0,0	1,3
150	27,9	17,5	10,0	0,4	0,0	0,4
160	23,7	13,6	6,5	0,0	0,0	0,0
170	19,8	9,8	3,8	0,0	0,0	0,0
180	16,0	6,5	1,8	0,0	0,0	0,0

... Continúa Cuadro 5.6.

Tiempo	M _{T:S} =100	M _{T:S} =80	M _{T:S} =60	M _{T:S} =40	M _{T:S} =20	M _{T:S} =0
min	Variación de la humedad retenida (en porcentaje)					
190	12,5	3,7	0,6	0,0	0,0	0,0
200	9,2	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
210	6,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
220	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
230	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

El efecto de la presencia de la turba en las mezclas evaluadas es evidente, puesto que de manera visual se aprecian cambios notorios en la tendencia de la disminución de la humedad retenida de acuerdo a cada una de las proporciones de estudio. El peso de cada mezcla (turba-suelo) obtenido durante la hidratación inicial, previo al análisis termogravimétrico, respecto al contenido de materia orgánica nativa en cada uno de los suelos estudiados se presenta en la Figura 5.7.

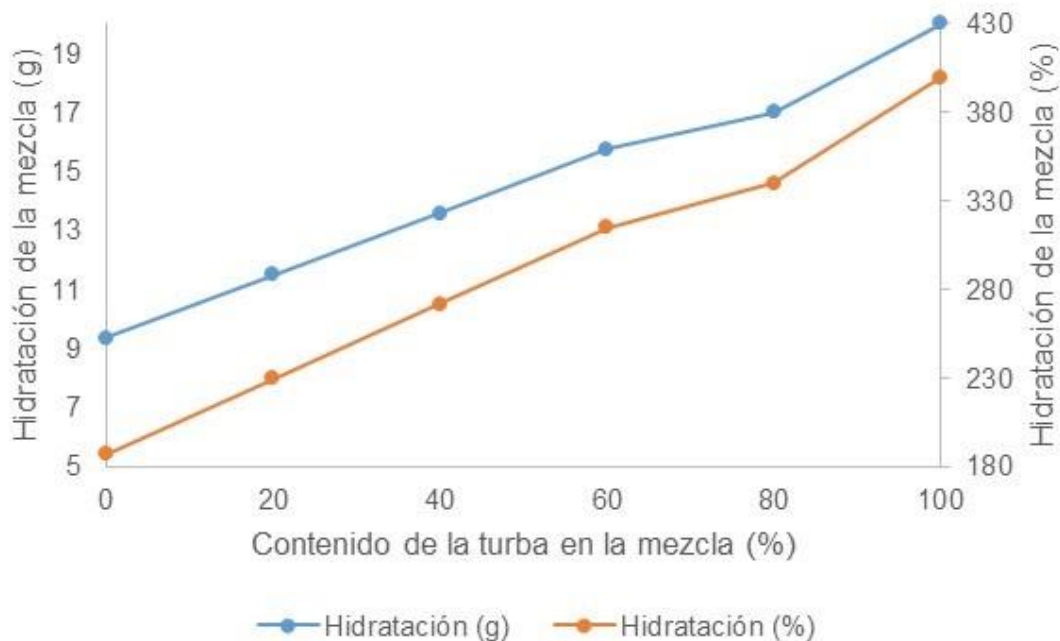


Figura 5.7. Variación del peso inicial como consecuencia de haber sido hidratada cada muestra. Las mezclas consisten en combinar una proporción específica de turba en un suelo arcilloso (46% de arcilla).

El cambio entre el peso inicial (posterior a la hidratación de cada muestra) y la proporción del contenido de turba en cada mezcla evaluada, describió una tendencia directamente proporcional, independientemente si la humedad se expresa en peso o en porcentaje. Las ecuaciones que describen lo anterior son las siguientes:

$$H_G = f(M_{T:S})$$

$$y = 0,103x + 9.38 \quad R^2 = 0.9929$$

$$H_P = f(M_{T:S})$$

$$y = 2,06x + 187.6 \quad R^2 = 0.9929$$

Donde H_G y H_P se refieren al peso inicial posterior a la hidratación, expresados en gramos o en porcentaje, respectivamente. Mientras que $M_{T:S}$ representa cada una de las mezclas que se evaluaron, las cuales consistieron de la combinación de turba con el suelo arcilloso.

Al igual que los ensayos mostrados previamente en el presente documento, nuevamente se observó un vínculo muy estrecho entre el peso inicial posterior a la hidratación, con el tiempo al que llegó cada muestra a peso constante, lo cual implica el agotamiento total del agua en el suelo. Esto se aprecia en la Figura 5.8.

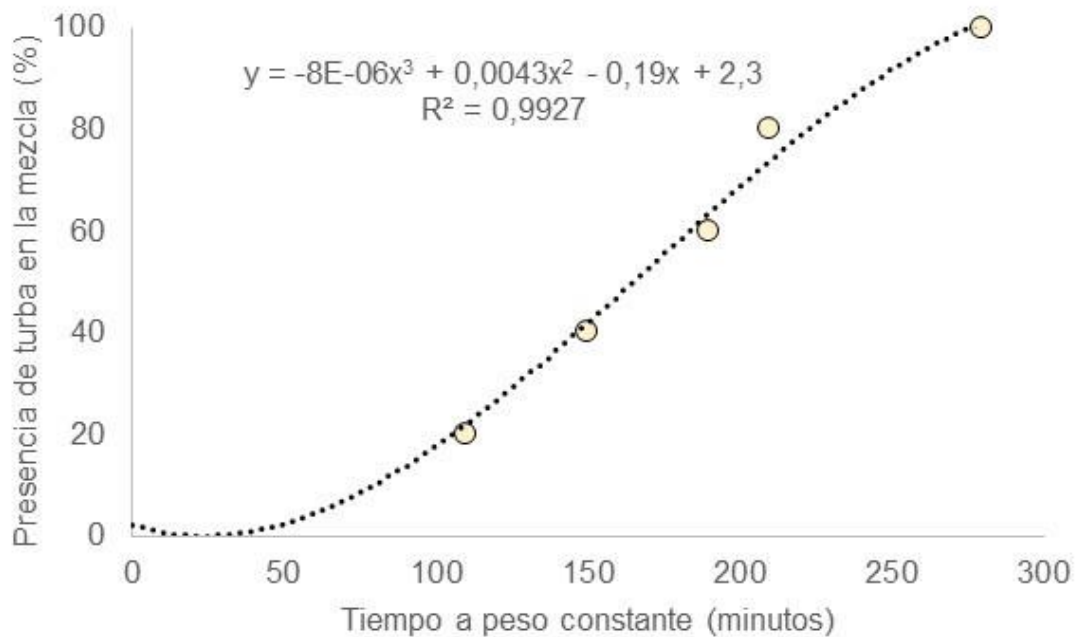


Figura 5.8. Tendencia de la relación del tiempo en que tarda la muestra en perder su humedad (peso constante), respecto a la proporción de turba presente en la mezcla en un suelo con 46% de arcilla.

En las mezclas de turba-suelo, la variación de los cambios en la humedad retenida a través del tiempo se presentan expresada en gramos (Figura 5.9) y en porcentaje (Figura 5.10), cuyas tendencias se obtuvieron al aplicar 50°C continuas hasta que cada muestra llegó a peso constante.

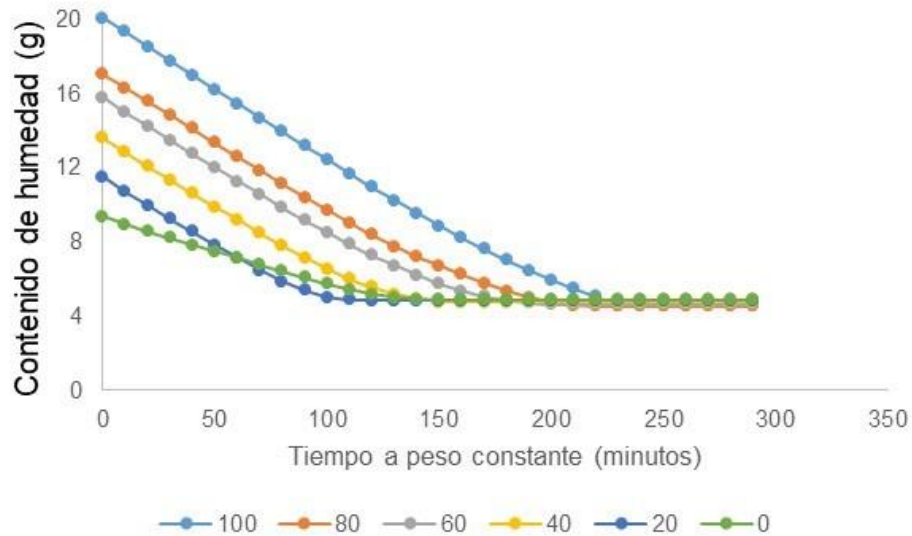


Figura 5.9. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad (expresada en gramos) en las diferentes mezclas evaluadas de turba con suelo (46% de arcilla).

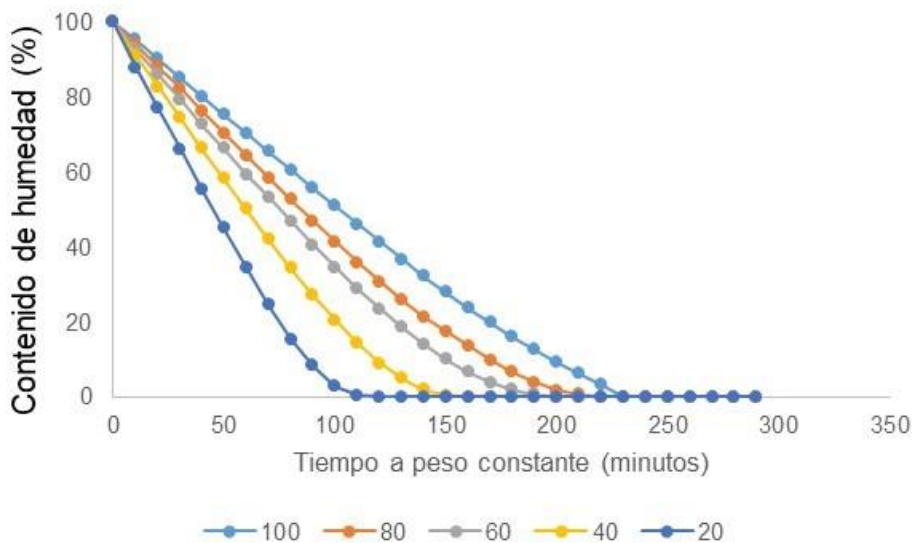


Figura 5.10. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad (expresada en porcentaje) en las diferentes mezclas evaluadas de turba con suelo (46% de arcilla).

En concordancia con lo encontrado en los experimentos ya comentados en el presente trabajo, la disminución en la humedad a través del tiempo expresada en forma gravimétrica se observa que es similar entre las distintas muestras, independientemente de la composición de cada mezcla

evaluada, pero esto nuevamente no ocurrió así al referirse a la humedad en términos proporcionales. La asociación cuantitativa entre dichas variables se presenta a través de su correspondiente análisis de regresión (Cuadro 5.7).

Cuadro 5.7. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) y porcentaje (H_P), por efecto de mezclas (M_{T:S}) con distinta proporción de turba y suelo.

M _{T:S}	H _G = f(T)	R ²	H _P = f(T)	R ²
0	y = -0,034x + 9,2	0,9960	y = -0,786x + 98,2	0,9987
20	y = -0,066x + 11,3	0,9939	y = -0,994x + 96,7	0,9939
40	y = -0,066x + 13,3	0,9944	y = -0,750x + 97,1	0,9944
60	y = -0,065x + 15,3	0,9984	y = -0,597x + 96,8	0,9943
80	y = -0,065x + 16,6	0,9994	y = -0,533x + 97,3	0,9941
100	y = -0,070x + 19,6	0,9959	y = -0,457x + 98,1	0,9970

La tendencia observada de la disminución del contenido de humedad a través del tiempo durante el análisis termogravimétrico resultó un tanto diferente a lo que se había obtenido hasta el momento en la presente investigación. Por ello y con el propósito de tratar de entender lo que ocurrió y encontrar alguna causa que lo explique, se continuó con este estudio, pero ahora enfocándose a la evaluación de la adición de diferentes residuos orgánicos, cuyos resultados se muestran en las siguientes secciones.

- Comparación de los cambios en la humedad retenida en compost y turba, como ejemplo de materiales orgánicos de uso frecuente en el medio agrícola

El Cuadro 5.8 contiene los resultados que se generaron durante el estudio termogravimétrico al evaluar diferentes mezclas de compost y turba, respecto al cambio en la humedad retenida en cada caso, la cual está representada por la modificación del peso del material al aplicar una temperatura constante de 50°C durante todo el experimento.

Cuadro 5. 8 Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de compost y turba (M_{C:T}) en distintas proporciones a 50°C de temperatura constante.

Tiempo	M _{C:T}				
	(80-20)	(60-40)	(40-60)	(20-80)	(0-100)
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)				
0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
10	11,2	13,3	15,3	17,3	19,3
20	10,4	12,6	14,7	16,6	18,5
30	9,7	11,9	13,9	16,0	17,7
40	9,0	11,2	13,2	15,3	16,9
50	8,3	10,6	12,6	14,6	16,2
60	7,6	9,9	11,9	13,9	15,4
70	6,9	9,2	11,2	13,2	14,7
80	6,3	8,5	10,5	12,5	13,9
90	5,7	7,9	9,9	11,9	13,1
100	5,3	7,2	9,2	11,2	12,4
110	5,0	6,6	8,6	10,5	11,7
120	4,9	6,1	8,0	9,9	10,9
130	4,9	5,6	7,5	9,3	10,2
140	4,9	5,2	6,9	8,7	9,5
150	4,9	5,0	6,4	8,1	8,8
160	4,9	4,9	6,0	7,6	8,2
170	4,9	4,9	5,7	7,0	7,6
180	4,9	4,9	5,4	6,6	7,0
190	4,9	4,9	5,2	6,2	6,5
200	4,9	4,9	5,1	5,8	5,9

... Continúa Cuadro 5.8.

Tiempo	M _{C:T}				
	(80-20)	(60-40)	(40-60)	(20-80)	(0-100)
min	Variación de la humedad retenida (en gramos)				
210	4,9	4,9	5,1	5,5	5,5
220	4,9	4,9	5,1	5,2	5,0
230	4,9	4,9	5,1	5,2	4,6
240	4,9	4,9	5,1	5,1	4,3
250	4,9	4,9	5,1	5,1	4,0
260	4,9	4,9	5,1	5,1	3,7
270	4,9	4,9	5,1	5,1	3,6
280	4,9	4,9	5,1	5,1	3,5
290	4,9	4,9	5,1	5,1	3,4
300	4,9	4,9	5,1	5,1	3,4
	Variación de la humedad retenida (en porcentaje)				
0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	88,3	92,2	93,6	94,8	95,6
20	77,8	84,7	87,7	89,5	90,9
30	67,5	77,2	80,7	84,1	86,1
40	57,3	69,7	74,5	78,8	81,5
50	47,3	62,2	68,3	73,4	76,9
60	37,3	54,7	62,1	68,1	72,3
70	27,7	47,4	56,0	62,9	67,7
80	18,8	40,1	49,8	57,6	63,2
90	11,1	32,8	43,8	52,3	58,6
100	4,9	25,9	37,9	47,1	54,2

... Continúa Cuadro 5.8.

Tiempo	M _{C:T}				
	(80-20)	(60-40)	(40-60)	(20-80)	(0-100)
min	Variación de la humedad retenida (en porcentaje)				
110	1,3	19,4	32,2	42,0	49,6
120	0,1	13,5	26,7	37,0	45,2
130	0,0	8,3	21,5	32,1	40,9
140	0,0	4,2	16,6	27,5	36,7
150	0,0	1,6	12,1	23,0	32,6
160	0,0	0,3	8,3	18,8	28,7
170	0,0	0,0	5,1	14,8	25,1
180	0,0	0,0	2,7	11,1	21,5
190	0,0	0,0	1,1	7,8	18,3
200	0,0	0,0	0,2	5,1	15,2
210	0,0	0,0	0,0	2,9	12,3
220	0,0	0,0	0,0	0,6	9,6
230	0,0	0,0	0,0	0,6	7,2
240	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3
250	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
260	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9
270	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
280	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
290	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

El efecto de la turba en las mezclas evaluadas, al igual que en los experimentos previos ya comentados, nuevamente es evidente porque se aprecian cambios notorios diferenciales en la tendencia de la disminución de la humedad retenida, según la composición de cada mezcla.

En la Figura 5.11 se presenta la variación del peso inicial alcanzado de cada mezcla compuesta de compost y turba, durante la hidratación previa al análisis termogravimétrico. Es importante recordar que en este experimento los materiales orgánicos no se combinaron con el suelo.

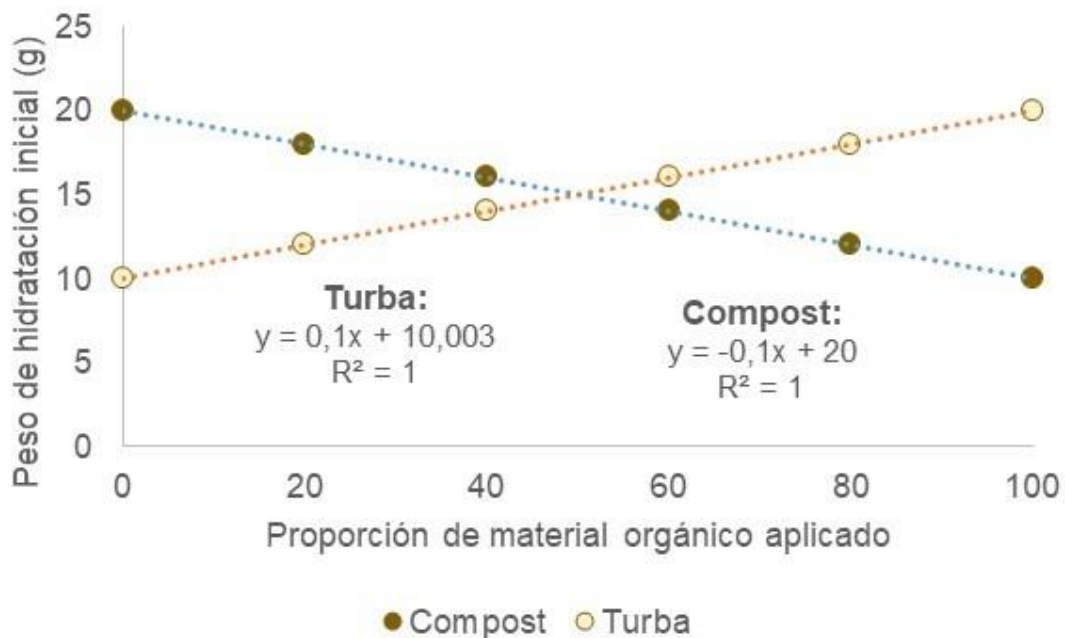


Figura 5.11. Mezcla compost: turba. Efecto sobre la hidratación inicial a distintas proporciones de las distintas mezclas preparadas.

Los efectos observados con ambos materiales son contrarios, puesto que mientras la turba propició una mayor retención de humedad en la mezcla, el compost se comportó como un material no propenso a almacenar agua, o al menos no con la misma forma en que actuó la turba y dicha tendencia se pone en evidencia una vez más cuando se evalúa el tiempo requerido para alcanzar una deshidratación completa del material orgánico según su composición en la proporción de cada componente (Figura 5.12).

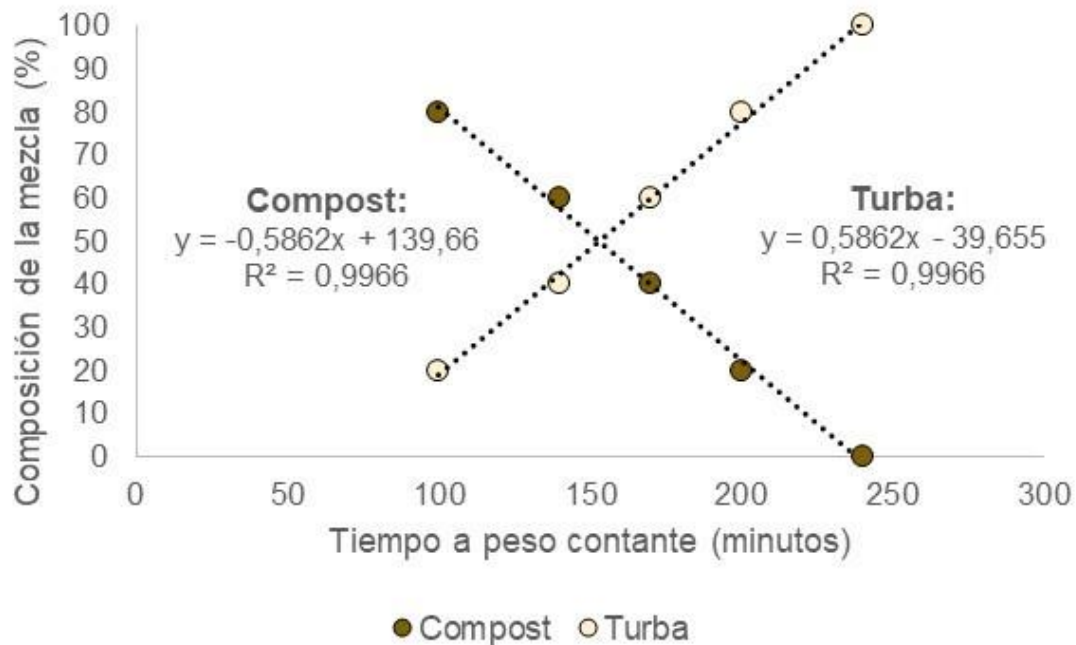


Figura 5.12. Mezcla compost: turba. Tiempo requerido para alcanzar una deshidratación completa del material orgánico según la composición en la proporción de cada componente de las mezclas estudiadas.

La tendencia de la variación de la pérdida de humedad en las diferentes mezclas evaluadas respecto al tiempo durante el análisis termogravimétrico se presenta en la Figura 5.13, en la cual se aprecia nuevamente que hay un agotamiento de la humedad a una tasa constante y la diferencia se atribuye al valor de hidratación inicial. Esta afirmación se nota con mayor claridad al analizar la relación cuantitativa entre ambas variables (humedad y tiempo), cuyas ecuaciones de regresión se muestran en el Cuadro 5.9.

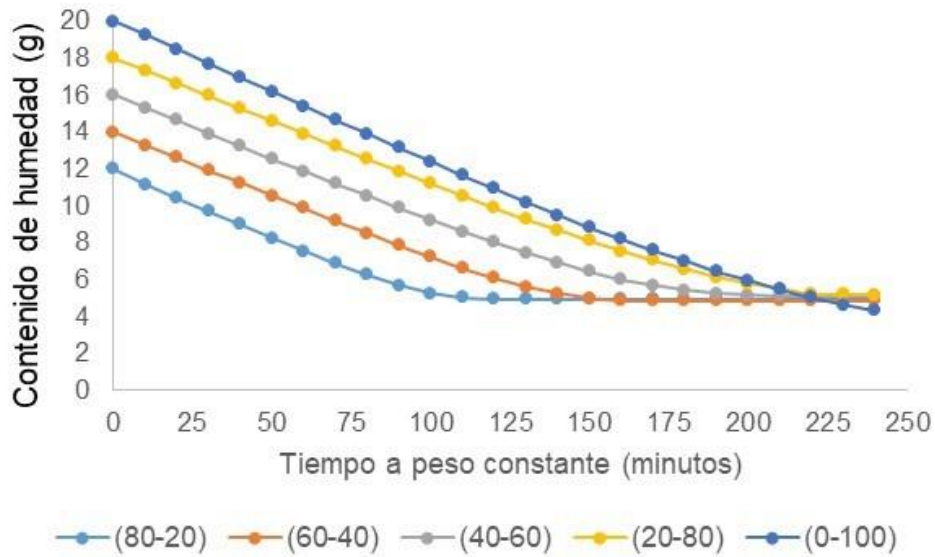


Figura 5.13. Tendencia de la variación de la pérdida de humedad en las diferentes mezclas evaluadas. La proporción de compost: turba de cada caso se indica entre paréntesis.

Cuadro 5.9. Ecuaciones de regresión de la variación del contenido de humedad en relación al tiempo para mezclas de compost y turba a una temperatura constante de 50°C. La humedad es expresada en peso (HG) y porcentaje (HP).

Compost	Turba	$H_G = f(T)$	R^2
%	%	Valores proporcionales	
80	20	$y = -0,965x + 97,1$	$R^2 = 0,9960$
60	40	$y = -0,702x + 98,0$	$R^2 = 0,9967$
40	60	$y = -0,574x + 97,5$	$R^2 = 0,9955$
20	80	$y = -0,489x + 97,8$	$R^2 = 0,9960$
0	100	$y = -0,408x + 96,8$	$R^2 = 0,9928$
		Valores absolutos	
80	20	$y = -0,068x + 11,8$	$R^2 = 0,9960$
60	40	$y = -0,064x + 13,8$	$R^2 = 0,9967$
40	60	$y = -0,062x + 15,7$	$R^2 = 0,9955$
20	80	$y = -0,063x + 17,7$	$R^2 = 0,9960$
0	100	$y = -0,068x + 19,5$	$R^2 = 0,9928$

La variación de la retención de humedad en las mezclas respecto al tiempo cambia según la composición de cada una de ellas. Donde predomina la turba sobre el compost, el contenido de

agua en el sustrato orgánico prevalecerá por más tiempo. De hecho, si consideramos la tasa de disminución de la humedad en términos proporcionales (K_H) y la evaluamos respecto a la concentración de turba en la mezcla (T_M) obtenemos la siguiente ecuación:

$$K_H = -7E-05 T_M^2 - 0,0007T_M - 0,42 \quad R^2 = 0,9908$$

Los valores que arroja esta ecuación confirman nuevamente la mayor capacidad de retención de humedad que provee la turba respecto a lo que hace el compost evaluado, con cambios notorios en la tasa (K_H) más negativos a medida que disminuye la concentración de la turba y viceversa.

- Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de alfalfa como material orgánico.

Con la finalidad de evaluar los cambios en la retención de humedad en el medio, se probaron dosis crecientes de alfalfa y se aplicaron en suelos con distinta concentración de materia orgánica nativa del suelo, pero sin que la diferencia en la cantidad de arcilla entre los suelos fuese significativa. Los resultados que se generaron durante el estudio termogravimétrico respecto al cambio en la humedad retenida en cada caso, representada por la modificación del peso del material al aplicar una temperatura de 50°C constantes durante todo el experimento, se presentan en el Cuadro 5.10.

Cuadro 5.10. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de alfalfa y suelos ($M_{A:S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Alfalfa aplicada					Alfalfa aplicada					Alfalfa aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
0	12,8	11,4	10,2	8,8	15,0	12,9	11,6	10,8	9,1	15,8	13,0	11,8	10,8	9,6	16,9
10	12,0	10,7	9,3	8,1	14,2	12,1	10,9	9,6	8,5	15,0	12,2	11,1	10,1	8,9	16,2
20	11,3	10,0	8,7	7,3	13,5	11,4	10,3	8,5	7,8	14,3	11,5	10,4	9,4	8,2	15,5

... Continúa Cuadro 5.10.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Alfalfa aplicada					Alfalfa aplicada					Alfalfa aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
30	10,6	9,4	8,0	6,8	12,8	10,7	9,7	7,8	7,2	13,6	10,9	9,8	8,8	7,6	14,8
40	9,9	8,7	7,4	6,2	12,1	10,1	9,0	7,6	6,5	12,9	10,2	9,1	8,2	7,0	14,1
50	9,3	8,1	6,8	5,8	11,4	10,1	8,4	7,2	5,9	12,2	9,5	8,5	7,5	7,0	13,4
60	8,7	7,4	6,1	5,3	10,8	8,8	7,8	6,9	5,4	11,6	8,9	7,8	6,9	6,4	12,7
70	8,0	6,8	5,5	5,0	10,2	8,2	7,3	6,3	5,1	10,9	8,3	7,2	6,4	6,4	12,0
80	7,4	6,3	5,1	5,0	9,9	7,6	6,7	5,8	5,0	10,4	7,7	6,7	5,9	5,8	11,4
90	6,9	5,7	4,7	5,0	9,8	7,1	6,2	5,3	5,0	10,0	7,1	6,1	5,5	5,8	10,8
100	6,3	5,2	4,4	5,0	9,7	6,5	5,8	4,9	5,0	9,8	6,5	5,6	5,1	5,2	10,3
110	5,7	4,7	4,3	5,0	9,7	6,0	5,4	4,7	5,0	9,6	6,0	5,2	4,9	5,2	10,0
120	5,2	4,4	4,3	5,0	9,7	5,5	4,9	4,6	5,0	9,6	5,5	4,8	4,8	4,8	9,8
130	4,8	4,1	4,3	5,0	9,7	5,1	4,9	4,6	5,0	9,6	5,1	4,5	4,8	4,8	9,7
Variación de la humedad retenida (en porcentaje)															
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	90,0	88,8	84,2	81,1	82,6	90,4	89,9	79,7	83,8	87,0	90,7	89,5	88,3	84,6	89,3
20	81,0	78,2	71,1	61,7	68,8	81,4	80,0	61,5	67,7	74,9	82,0	79,5	77,0	68,9	79,2
30	72,2	67,8	58,0	46,5	55,1	72,8	70,5	48,4	52,0	62,8	73,5	69,7	65,9	56,5	69,2
40	63,6	57,6	46,0	30,8	41,4	65,3	61,0	45,1	36,6	50,7	65,1	60,2	54,9	43,7	59,2
50	55,2	47,7	34,1	20,0	28,0	64,5	51,9	38,1	22,3	38,7	57,0	50,8	44,1	43,6	49,3
60	47,1	37,9	22,1	6,9	15,1	48,7	42,8	33,6	10,5	26,8	49,0	41,6	33,7	30,8	39,3
70	39,1	28,6	10,2	0,9	4,5	40,8	34,3	23,1	2,5	15,8	41,2	32,9	24,0	30,8	29,4
80	31,4	19,6	2,7	0,0	0,0	33,4	26,2	13,6	0,0	6,5	33,6	24,4	15,2	18,0	19,6
90	23,8	10,9	0,0	0,0	0,0	26,2	18,9	5,2	0,0	0,0	26,4	16,3	7,9	17,9	11,1
100	16,5	3,0	0,0	0,0	0,0	19,2	12,0	0,0	0,0	0,0	19,3	8,9	2,5	5,1	4,0
110	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	12,8	6,3	0,0	0,0	0,0	12,6	2,3	0,0	5,0	0,0
120	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0
130	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0

El efecto de la alfalfa contenida en las mezclas, respecto a los cambios en la retención de humedad se evaluó desde el punto de vista estadístico. Las tendencias observadas al minuto 50 y su significancia se presentan a continuación.

El análisis de variación realizado a los 50 minutos (Cuadro 5.11) demostró que existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los tratamientos con diferentes niveles de alfalfa, por lo que se concluye que la adición de diferentes niveles de alfalfa no produce el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua de las muestras, también se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los contenidos nativos de materia orgánica de las tres muestras de suelo, por lo que se concluye que no todos los contenidos de MO nativa de los suelos producen el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua.

Cuadro 5.11. Análisis de varianza de la retención de humedad de diferentes mezclas de alfalfa y suelos ($M_{A,S}$) con diferentes cantidades de materia orgánica nativa (M_O), a los 50 minutos a 50°C de temperatura constante.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr(>F)
Tratamiento	1	1152.0	1152.0	17.17	0.00136 **
Bloque	1	357.6	357.6	5.33	0.03957 *
Residual	12	805.1	67.1		

Significado del código: ‘***’ 0.01 y ‘*’ 0.05

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 5.12) para los tratamientos mostraron que las proporciones 80% y 60% de alfalfa retuvieron la mayor humedad y fueron estadísticamente iguales, las proporciones 40% y 20% fueron las segundas mejores e iguales entre si y la muestra sin compost retuvo la menor cantidad.

Cuadro 5.12. Comparación de medias para la comprobación del efecto de los diferentes niveles de alfalfa sobre la retención de humedad a 50°C de temperatura constante.

Tratamientos	Respuesta	Grupo
	gramos	
1	58.9	a
2	50.1	a
3	38.8	ab
4	38.7	ab
5	28.6	b

% de alfalfa de cada bloque. 1 (80%), 2 (60%), 3 (40%), 4 (20%) y 5 (0%)

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 5.13) para los bloques mostraron que las proporciones de MO nativas del suelo tuvieron efecto positivo sobre el almacenamiento de agua del suelo y el efecto fue mayor en las muestras con 4.8% de MO, después le siguió el valor de 3.6 y por último el 2.5%.

Cuadro 5.13. Comparación de medias para la comprobación del efecto del contenido de materia orgánica nativa sobre la retención de humedad a 50°C de temperatura constante.

Bloque	Respuesta	Grupo
	gramos	
C	49.0	a
B	43.1	b
A	37.0	c

% de MO nativa de cada bloque. A (2.5%), B (3.6%) y C (4.8%)

Los resultados de este experimento confirman el mismo efecto observado en otros casos, por lo cual se ha demostrado que tanto la adición de materiales orgánicos y el incremento de la MO nativa del suelo son factores que contribuyen con la mejora de propiedades físicas del suelo para incrementar su capacidad de almacenamiento de agua, resultados similares fueron descritos por Aranyos, *et al.*, (2016) quien estudio el efecto de la aplicación de compost y observó que los suelos tratados tuvieron mejora de su estructura, incremento de su contenido de MO, mejora de la infiltración, reducción de la erosión, reducción de la compactación.

La relación entre el peso de hidratación inicial de la mezcla con alfalfa aplicada (en porcentaje del peso total de la mezcla) y el contenido de materia orgánica nativa del suelo, se muestran en la Figura 5.14.

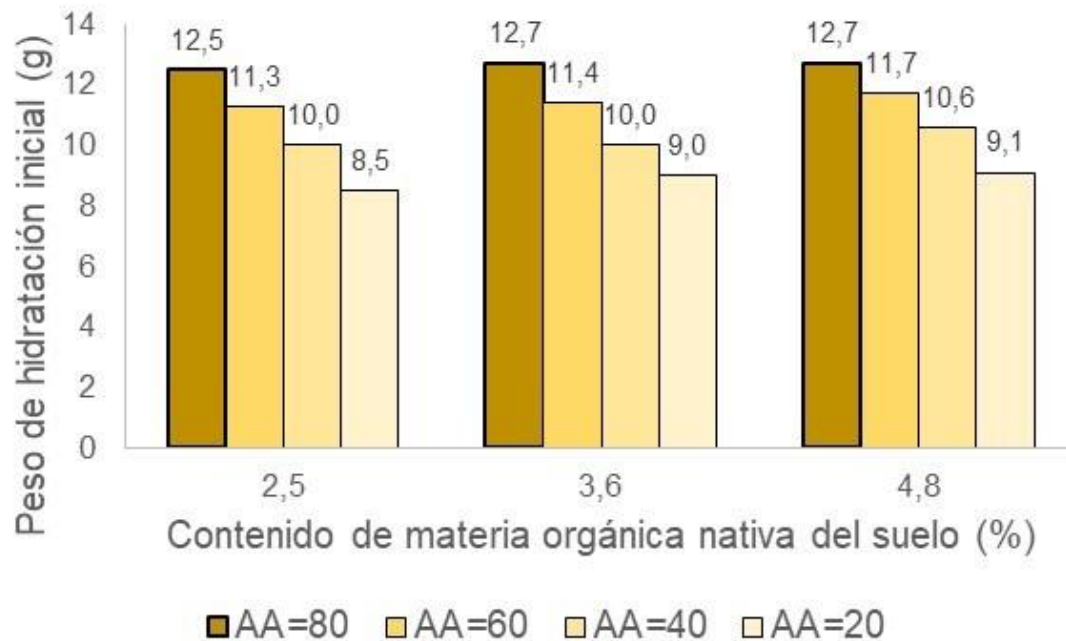


Figura 5.14. Relación entre el peso de hidratación inicial de la mezcla con alfalfa (AA) aplicada (expresada en porcentaje del peso total de la mezcla) y el contenido de materia orgánica nativa del suelo.

Los cambios en el peso de hidratación al inicio del análisis termogravimétrico estuvieron influidos más por la cantidad de material orgánico aplicado (en este caso alfalfa), que por la concentración de materia orgánica nativa del suelo. La relación cuantitativa entre la modificación de la retención de la humedad respecto al tiempo se presenta en el Cuadro 5.14.

Cuadro 5.14 Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) y porcentaje (H_P), por efecto de distinta proporción de alfalfa (A_A) y suelo con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A)

	A=36%; $M_O=2,5\%$		A=41%; $M_O=3,6\%$		A=40%; $M_O=4,8\%$	
A_A	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
$H_G = f(T)$						
%						
80	$y = -0,062x + 12,5$	0,997	$y = -0,061x + 12,7$	0,993	$y = -0,061x + 12,7$	0,996
60	$y = -0,063x + 11,3$	0,998	$y = -0,057x + 11,4$	0,995	$y = -0,061x + 11,7$	0,996
40	$y = -0,063x + 10,0$	0,995	$y = -0,056x + 10,1$	0,951	$y = -0,056x + 10,6$	0,993
20	$y = -0,054x + 8,5$	0,981	$y = -0,059x + 9,0$	0,992	$y = -0,038x + 9,1$	0,950
0	$y = -0,069x + 14,9$	0,997	$y = -0,066x + 15,7$	0,995	$y = -0,065x + 16,8$	0,995
$H_P = f(T)$						
80	$y = -0,807x + 97,1$	0,997	$y = -0,769x + 97,3$	0,993	$y = -0,767x + 96,8$	0,996
60	$y = -0,973x + 97,8$	0,998	$y = -0,863x + 97,0$	0,995	$y = -0,895x + 97,2$	0,996
40	$y = -1,222x + 96,5$	0,995	$y = -0,945x + 87,3$	0,951	$y = -0,999x + 96,7$	0,993
20	$y = -1,435x + 93,7$	0,981	$y = -1,429x + 97,0$	0,992	$y = -0,826x + 87,5$	0,950
0	$y = -1,360x + 97,0$	0,997	$y = -1,179x + 98,7$	0,998	$y = -0,974x + 98,7$	0,998

La tendencia prácticamente se mantuvo constante entre el cambio de la humedad retenida en el material evaluado (mezcla de alfalfa con el suelo) y el tiempo que lleva hasta agotarse totalmente la humedad en el suelo (variable de referencia considerada como peso constante), como ha ocurrido en todos los ensayos que se han discutido en este trabajo. En concordancia con lo anterior, en el Cuadro 5.15 están las ecuaciones de regresión de la tasa de cambio en la humedad (en valor porcentual), respecto a la dosis de alfalfa aplicada en cada uno de los suelos estudiados.

Cuadro 5.15. Ecuaciones de regresión entre la tasa de cambio (K_H) en la humedad retenida (expresada en %/min) y alfalfa (A_A) aplicada en cada mezcla ensayada, en suelos con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A).

A=36%; $M_O=2,5\%$		A=41%; $M_O=3,6\%$		A=40%; $M_O=4,8\%$	
$K_H = f(A_A)$	R^2	$K_H = f(A_A)$	R^2	$K_H = f(A_A)$	R^2
$y=0,461\ln(x)-2,85$	0,972	$y=0,474\ln(x)-2,79$	0,935	$y=0,326\ln(x)-2,20$	0,970

De acuerdo con las evidencias mostradas en este experimento, el material orgánico aplicado al suelo tiene un mayor efecto sobre la retención de humedad del suelo, respecto a lo que pudiese ocurrir con la materia orgánica nativa edáfica.

- Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de paja de avena como material orgánico

En este experimento se realizó un estudio similar al anterior, pero ahora se evaluaron los cambios en la retención de humedad con dosis crecientes de paja de avena, aplicadas en suelos con distinta concentración de materia orgánica nativa del suelo, sin que la diferencia en la cantidad de arcilla entre los suelos fuese significativa. Los resultados generados durante el estudio termogravimétrico respecto al cambio en la humedad retenida en cada caso, representada por el cambio del peso del material a una temperatura constante de 50°C durante todo el experimento, se presentan en el Cuadro 5.16.

Cuadro 5.16. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de paja de avena y suelo (M_{P.S}) que tenía distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina (40.3%±3.3% promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
0	29,4	27,7	21,0	14,3	15,0	30,4	27,8	21,2	13,8	15,8	31,2	28,0	21,6	15,0	16,9
10	28,8	27,2	20,4	13,6	14,2	29,9	27,2	20,6	13,0	15,0	30,6	27,3	20,9	14,4	16,2
20	28,0	26,5	19,3	12,8	13,5	29,2	26,5	19,9	12,4	14,3	30,0	26,7	20,2	13,8	15,5
30	27,2	25,7	19,0	12,2	12,8	28,4	25,8	19,2	11,7	13,6	29,3	26,0	19,6	13,1	14,8
40	26,5	25,1	18,3	11,6	12,1	27,7	25,1	18,5	11,0	12,9	28,6	25,3	18,9	12,4	14,1
50	25,8	24,3	17,3	10,9	11,4	27,0	24,4	17,8	10,4	12,2	27,9	24,6	18,2	11,8	13,4

... Continúa Cuadro 5.16.

T min	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada				
	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
60	25,1	23,7	17,0	10,2	10,8	26,3	23,7	17,1	9,7	11,6	27,1	23,9	17,5	11,1	12,7
70	24,3	23,0	16,3	9,6	10,2	25,6	22,9	16,5	9,1	10,9	26,5	23,2	16,8	10,5	12,0
80	23,6	22,3	15,7	8,9	10,0	24,9	22,2	15,8	8,4	10,4	25,7	22,5	16,1	9,8	11,4
90	22,9	21,6	15,3	8,3	10,0	24,2	21,5	15,1	7,8	10,0	25,1	21,8	15,4	9,1	10,8
100	22,1	20,9	14,4	7,6	10,0	23,5	20,8	14,4	7,1	10,0	24,4	21,1	14,8	8,5	10,3
110	21,4	20,2	13,7	7,0	10,0	22,8	20,1	13,8	6,5	10,0	23,6	20,4	14,1	7,8	10,0
120	20,7	19,5	13,0	6,4	10,0	22,1	19,4	13,1	5,9	10,0	23,0	19,7	13,4	7,2	10,0
130	20,0	18,8	12,4	5,8	10,0	21,4	18,7	12,4	5,4	10,0	22,3	19,0	12,7	6,6	10,0
140	19,2	18,2	11,7	5,3	10,0	20,7	18,0	11,8	5,0	10,0	21,6	18,3	12,1	6,0	10,0
150	18,5	17,5	11,1	5,0	10,0	20,0	17,3	11,0	5,0	10,0	20,8	17,6	11,4	5,4	10,0
160	17,8	16,8	10,4	5,0	10,0	19,3	16,6	10,3	5,0	10,0	20,2	16,9	10,7	5,0	10,0
170	17,1	16,1	9,8	5,0	10,0	18,6	15,9	9,8	5,0	10,0	19,5	16,2	10,1	5,0	10,0
180	16,4	15,5	9,2	5,0	10,0	17,9	15,2	9,2	5,0	10,0	18,8	15,5	9,4	5,0	10,0
190	15,7	14,8	8,5	5,0	10,0	17,2	14,6	8,5	5,0	10,0	18,1	14,8	8,8	5,0	10,0
200	15,0	14,1	7,9	5,0	10,0	16,5	13,9	7,9	5,0	10,0	17,4	14,2	8,2	5,0	10,0
210	14,3	13,5	7,3	5,0	10,0	15,9	13,2	7,4	5,0	10,0	16,7	13,5	7,6	5,0	10,0
220	13,7	12,8	6,7	5,0	10,0	15,2	12,5	6,8	5,0	10,0	16,1	12,8	7,0	5,0	10,0
230	13,0	12,1	6,1	5,0	10,0	14,5	11,9	6,3	5,0	10,0	15,4	12,2	6,5	5,0	10,0
240	12,4	11,5	5,4	5,0	10,0	14,0	11,2	5,8	5,0	10,0	14,7	11,5	6,0	5,0	10,0
250	12,0	10,9	5,0	5,0	10,0	13,3	10,6	5,4	5,0	10,0	14,1	10,9	5,5	5,0	10,0
260	11,2	10,1	5,0	5,0	10,0	12,6	10,0	5,1	5,0	10,0	13,4	10,3	5,1	5,0	10,0

... Continúa Cuadro 5.16.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
270	10,7	9,6	5,0	5,0	10,0	12,1	9,4	5,0	5,0	10,0	12,8	9,7	5,0	5,0	10,0
280	10,1	9,1	5,0	5,0	10,0	11,5	8,8	5,0	5,0	10,0	12,2	9,1	5,0	5,0	10,0
290	9,6	8,5	5,0	5,0	10,0	10,9	8,2	5,0	5,0	10,0	11,6	8,5	5,0	5,0	10,0
300	9,1	7,9	5,0	5,0	10,0	10,3	7,7	5,0	5,0	10,0	11,0	8,0	5,0	5,0	10,0
310	8,6	7,4	5,0	5,0	10,0	9,8	7,2	5,0	5,0	10,0	10,5	7,5	5,0	5,0	10,0
320	8,1	6,9	5,0	5,0	10,0	9,2	6,7	5,0	5,0	10,0	9,9	7,0	5,0	5,0	10,0
330	7,7	6,5	5,0	5,0	10,0	8,7	6,2	5,0	5,0	10,0	9,4	6,6	5,0	5,0	10,0
340	7,3	6,1	5,0	5,0	10,0	8,3	5,8	5,0	5,0	10,0	8,9	6,2	5,0	5,0	10,0
350	6,9	5,7	5,0	5,0	10,0	7,8	5,0	5,0	5,0	10,0	8,4	5,8	5,0	5,0	10,0
360	6,5	5,3	5,0	5,0	10,0	7,4	5,0	5,0	5,0	10,0	8,0	5,5	5,0	5,0	10,0
370	6,1	5,1	5,0	5,0	10,0	7,0	5,0	5,0	5,0	10,0	7,5	5,2	5,0	5,0	10,0
380	5,8	5,0	5,0	5,0	10,0	6,6	5,0	5,0	5,0	10,0	7,1	5,0	5,0	5,0	10,0
390	5,4	5,0	5,0	5,0	10,0	6,3	5,0	5,0	5,0	10,0	6,7	5,0	5,0	5,0	10,0
400	5,1	5,0	5,0	5,0	10,0	6,0	5,0	5,0	5,0	10,0	6,3	5,0	5,0	5,0	10,0
410	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,8	5,0	5,0	5,0	10,0	5,9	5,0	5,0	5,0	10,0
420	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,6	5,0	5,0	5,0	10,0	5,6	5,0	5,0	5,0	10,0
430	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,5	5,0	5,0	5,0	10,0	5,3	5,0	5,0	5,0	10,0
440	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,4	5,0	5,0	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0
450	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	5,0	10,0
Variación de la humedad retenida (en porcentaje)															
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	97,6	97,7	96,0	92,4	82,6	97,8	97,5	96,3	91,5	87,0	98,1	96,9	95,6	94,1	89,3

... Continúa Cuadro 5.16.

T min	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada				
	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en porcentaje)															
20	94,4	94,6	89,2	84,0	68,8	95,1	94,3	92,0	83,7	74,9	95,5	94,2	91,7	87,5	79,2
30	91,2	91,5	87,4	77,9	55,1	92,3	91,2	87,7	76,1	62,8	92,8	91,1	87,5	80,9	69,2
40	88,4	88,4	83,2	70,7	41,4	89,5	88,0	83,5	68,6	50,7	90,1	88,0	83,4	74,3	59,2
50	85,4	85,3	76,5	63,6	28,0	86,7	84,9	79,3	61,1	38,7	87,4	85,0	79,3	67,7	49,3
60	82,4	82,4	74,8	56,5	15,1	83,9	81,8	75,1	53,7	26,8	84,7	81,9	75,1	61,0	39,3
70	79,4	79,3	70,7	49,3	4,5	81,1	78,7	70,9	46,2	15,8	82,0	78,9	71,0	54,5	29,4
80	76,4	76,2	66,6	42,3	0,0	78,3	75,6	66,7	38,9	6,5	79,3	75,9	66,9	47,9	19,6
90	73,3	73,3	64,4	35,2	0,0	75,5	72,5	62,6	31,5	0,0	76,7	72,8	62,5	41,4	11,1
100	70,4	70,2	58,3	28,3	0,0	72,8	69,4	58,4	24,3	0,0	74,0	69,8	58,8	34,9	4,0
110	67,4	67,1	54,2	21,5	0,0	70,0	66,3	54,3	17,2	0,0	71,3	66,8	54,7	28,4	0,0
120	64,4	64,1	50,1	14,8	0,0	67,2	63,2	50,1	10,4	0,0	68,7	63,7	50,6	22,0	0,0
130	61,4	61,0	46,0	8,6	0,0	64,5	60,2	46,0	4,4	0,0	66,0	60,7	46,6	15,7	0,0
140	58,5	58,2	41,9	3,4	0,0	61,7	57,1	42,0	0,0	0,0	63,3	57,7	42,5	9,6	0,0
150	55,5	55,2	37,8	0,0	0,0	58,9	54,0	37,3	0,0	0,0	60,3	54,6	38,5	4,0	0,0
160	52,5	52,2	33,8	0,0	0,0	56,2	51,0	32,6	0,0	0,0	58,0	51,6	34,5	0,0	0,0
170	49,6	49,1	29,8	0,0	0,0	53,5	47,9	29,8	0,0	0,0	55,4	48,6	30,6	0,0	0,0
180	46,7	46,1	25,9	0,0	0,0	50,8	44,9	25,9	0,0	0,0	52,6	45,6	26,7	0,0	0,0
190	43,9	43,2	22,0	0,0	0,0	48,1	41,9	21,9	0,0	0,0	50,1	42,6	22,9	0,0	0,0
200	41,1	40,2	18,2	0,0	0,0	45,4	38,9	18,2	0,0	0,0	47,5	39,7	19,2	0,0	0,0
210	38,2	37,3	14,3	0,0	0,0	42,7	35,9	14,6	0,0	0,0	44,9	36,8	15,6	0,0	0,0
220	35,6	34,3	10,4	0,0	0,0	40,1	33,0	11,1	0,0	0,0	42,3	33,9	12,1	0,0	0,0
230	33,0	31,4	6,6	0,0	0,0	37,5	30,1	7,9	0,0	0,0	39,7	31,1	8,8	0,0	0,0

... Continúa Cuadro 5.16.

T min	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%					
	Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					Paja de avena aplicada					
	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	
Variación de la humedad retenida (en gramos)																
240	30,4	28,6	2,7	0,0	0,0	35,4	27,2	5,1	0,0	0,0	37,2	28,3	6,3	0,0	0,0	
250	28,6	25,8	0,0	0,0	0,0	32,8	24,5	2,6	0,0	0,0	34,6	25,5	3,1	0,0	0,0	
260	25,6	22,5	0,0	0,0	0,0	29,9	21,7	0,6	0,0	0,0	32,2	22,9	0,7	0,0	0,0	
270	23,3	20,4	0,0	0,0	0,0	27,9	19,1	0,0	0,0	0,0	29,8	20,2	0,0	0,0	0,0	
280	21,0	17,9	0,0	0,0	0,0	25,5	16,5	0,0	0,0	0,0	27,5	17,7	0,0	0,0	0,0	
290	18,9	15,4	0,0	0,0	0,0	23,2	14,1	0,0	0,0	0,0	25,2	15,3	0,0	0,0	0,0	
300	16,8	13,0	0,0	0,0	0,0	20,9	11,7	0,0	0,0	0,0	23,0	13,0	0,0	0,0	0,0	
310	14,8	10,7	0,0	0,0	0,0	18,7	9,5	0,0	0,0	0,0	20,9	10,8	0,0	0,0	0,0	
320	12,9	8,6	0,0	0,0	0,0	16,5	7,4	0,0	0,0	0,0	18,8	8,8	0,0	0,0	0,0	
330	11,1	6,5	0,0	0,0	0,0	14,6	5,4	0,0	0,0	0,0	16,8	6,9	0,0	0,0	0,0	
340	9,3	4,6	0,0	0,0	0,0	12,8	3,6	0,0	0,0	0,0	14,9	5,2	0,0	0,0	0,0	
350	7,7	3,0	0,0	0,0	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1	3,6	0,0	0,0	0,0	
360	6,1	1,5	0,0	0,0	0,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	2,2	0,0	0,0	0,0	
370	4,5	0,3	0,0	0,0	0,0	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	0,9	0,0	0,0	0,0	
380	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
390	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
400	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
410	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	
420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
430	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
440	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

El efecto de la paja de avena contenida en las mezclas sobre los cambios en la retención de humedad se evaluó desde el punto de vista estadístico y las tendencias observadas al minuto 50, así como su significancia se presentan a continuación.

El análisis de variación realizado a los 50 minutos demostró que existen diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los tratamientos con diferentes niveles de paja, por lo cual se concluye que la aplicación de paja produce diferentes efectos sobre la capacidad de almacenamiento de agua en las muestras, sin embargo, no se encontró diferencias significativas ($p=0.395$) entre los suelos con diferentes porcentajes de MO nativa, por lo que entonces para el caso del presente experimento, los porcentajes de MO nativa en los suelos producen el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua (Cuadro 5.17).

Cuadro 5.17. ANAVA del efecto de paja de avena y suelos ($M_{P,S}$) con distintas cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a temperatura constante de 50°C a los 50 minutos

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr(>F)
Tratamiento	1	542.7	542.7	109.678	2.17e-07 ***
Bloque	1	3.8	3.8	0.777	0.395
Residual	12	59.4	4.9		

Significado del código: '***' Altamente significativo ($P \leq 0.01$).

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 5.18) para los bloques (suelos con diferente porcentaje de paja) mostraron que las proporciones 80% y 60% fueron estadísticamente iguales y retuvieron la mayor cantidad de humedad, los tratamientos de 40% y 20% de paja tuvieron un efecto estadísticamente igual al tratamiento de 0% de paja; esto muestra un efecto similar en estas tres últimas proporciones, probablemente por la capacidad de absorción de la paja que es mayor al suelo y el efecto principal de la retención está dado por la paja y los efectos de la MO nativa no se notan.

Cuadro 5.18. Comparación de medias para la variación de la humedad en muestras de suelo con diferente concentración de paja de avena al ser sometidos a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.

Bloque	Respuesta	Grupo
	gramos	
A	26.9	a
B	24.4	a
C	17.8	b
E	12.3	bc
D	11.0	c

Porcentaje de paja de cada bloque. A (80%), B (60%), C (40%), D (20%) y E (0%)

Estos resultados muestran una vez más como la aplicación de un material orgánico en la matriz del suelo confiere sus propiedades en la retención de humedad y demuestra que entre mayor sea la capacidad de absorción de agua del material orgánico el efecto es mayor y el efecto de la MO nativa no se percibe pero sabemos que sigue estando. Este efecto puede ser similar al encontrado por Murphy, (2015), quien estudio el efecto de la MO nativa del suelo en contraste con las partículas minerales sobre la retención de humedad y encontró que el efecto de la MO nativa era enmascarada por el efecto de las partículas minerales por cuestión de la diferencia de magnitudes.

Ha sido consistente en todos los experimentos la relación entre el peso de hidratación inicial de los materiales evaluados con el tiempo requerido hasta llegar a peso constante, el cual implica el agotamiento total del agua retenida y el estudio con la aplicación de paja de avena no fue la excepción. Esto se aprecia de mejor manera en las ecuaciones de regresión que se presentan en el Cuadro 5.19.

Cuadro 5.19. Ecuaciones de regresión que describen la variación de la humedad expresada en peso (H_G) por efecto de distintas proporciones de paja de avena (P_A) y suelo con distinto contenido de materia orgánica nativa (M_O) y similar contenido de arcilla (A).

P_A	A=36%; $M_O=2,5\%$		A=41%; $M_O=3,6\%$		A=40%; $M_O=4,8\%$	
	$K_H = f(A_A)$	R^2	$K_H = f(A_A)$	R^2	$K_H = f(A_A)$	R^2
80	$y = -0,062x + 28,2$	0,988	$y = -0,060x + 29,2$	$R^2 = 0,985$	$y = -0,062x + 30,4$	0,992
60	$y = -0,063x + 27,2$	0,994	$y = -0,066x + 27,4$	$R^2 = 0,997$	$y = -0,063x + 27,4$	0,993
40	$y = -0,064x + 20,8$	0,999	$y = -0,064x + 20,9$	$R^2 = 0,997$	$y = -0,064x + 21,2$	0,996
20	$y = -0,063x + 14,0$	0,997	$y = -0,063x + 13,6$	$R^2 = 0,998$	$y = -0,064x + 14,9$	0,999
0	$y = -0,064x + 14,7$	0,989	$y = -0,065x + 15,6$	$R^2 = 0,995$	$y = -0,065x + 16,7$	0,995

Nuevamente, los cambios en el peso de hidratación al inicio del análisis termogravimétrico (representado por el intercepto de cada ecuación de regresión mostrada en el cuadro en discusión), estuvieron influidos más por la cantidad de paja de avena aplicada, que, por la concentración de materia orgánica nativa del suelo, donde la tasa de cambio prácticamente se mantuvo constante en todos los casos.

- Cambios en la retención de la humedad en suelos con diferente contenido de materia orgánica nativa y por la aplicación de turba como material orgánico

Al igual que en los dos casos previos (adición de alfalfa y paja de avena), en este experimento se evaluaron los cambios en la retención de humedad con dosis crecientes de turba, aplicadas en suelos con distinta concentración de materia orgánica nativa del suelo, sin que la diferencia en la cantidad de arcilla entre los suelos fuese significativa. Se seleccionó este material porque de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, ha sido el compuesto orgánico que mayor retención de humedad ha tenido, independientemente del tipo suelo considerado en los ensayos realizados. Los resultados generados durante el estudio termogravimétrico respecto al cambio en la humedad retenida por efecto de la adición de turba, representada por la modificación del peso del material al aplicar de 50°C constantes durante todo el experimento, se presentan en el Cuadro 5.20.

Cuadro 5.20. Disminución de la humedad (en gramos y %) en mezclas de turba y suelo ($M_{T:S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), pero con escasa variación de

fracción fina ($40.3\% \pm 3.3\%$ promedio de arcilla y desviación estándar, respectivamente) a 50°C de temperatura constante.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Turba aplicada					Turba aplicada					Turba aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
0	14,8	15,0	15,8	11,3	11,5	11,7	15,0	15,2	15,3	18,8	18,8	18,8			
10	14,0	14,2	15,0	10,4	10,8	11,0	14,3	14,4	14,5	18,0	18,1	18,1			
20	13,3	13,5	14,3	9,7	10,1	10,3	13,6	13,6	13,8	17,3	17,3	17,4			
30	12,6	12,8	13,6	9,0	9,4	9,6	12,9	12,9	13,0	16,6	16,6	16,6			
40	11,9	12,1	12,9	8,3	8,7	8,9	12,2	12,2	12,4	15,9	15,9	15,9			
50	11,2	11,4	12,2	7,6	8,0	8,2	11,5	11,4	11,6	15,2	15,2	15,2			
60	10,5	10,8	11,6	7,0	7,2	7,5	10,8	10,7	10,9	14,4	14,5	14,5			
70	10,1	10,2	10,9	6,3	6,7	6,8	10,1	10,0	10,2	13,8	13,8	13,8			
80	9,9	9,9	10,4	5,7	6,1	6,3	9,4	9,3	9,5	13,1	13,1	13,1			
90	9,8	9,8	10,0	5,2	5,6	5,7	8,7	8,6	8,8	12,4	12,5	12,5			
100	9,7	9,7	9,8	4,9	5,2	5,3	8,0	7,9	8,2	11,8	11,8	11,8			
110	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	5,0	7,4	7,3	7,6	11,1	11,2	11,2			
120	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	6,9	6,7	6,9	10,5	10,5	10,6			
130	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	6,1	6,2	6,4	9,9	9,9	10,0			
140	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,9	5,8	5,9	9,3	9,4	9,4			
150	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,5	5,4	5,5	8,8	8,8	8,8			
160	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,3	5,2	5,3	8,3	8,3	8,3			
170	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	7,8	7,8	7,9			
180	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	7,3	7,4	7,4			

... Cuadro 5.20.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Turba aplicada					Turba aplicada					Turba aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
180	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	7,3	7,4	7,4		
190	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	6,9	7,0	7,0		
200	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	6,5	6,6	6,6		
210	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	6,0	5,9	6,2		
220	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,9	5,7	6,0		
230	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,6	5,5	5,7		
240	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,5	5,4	5,5		
250	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,4		
260	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,3		
270	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,3		
280	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,3		
290	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,3		
300	9,7	9,7	9,6	4,8	5,0	4,8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,3	5,3	5,3		
Variación de la humedad retenida (en porcentaje)															
0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	82,8	83,4	87,7	87,5	88,2	89,3	93,0	92,1	92,3	94,7	94,7	94,7	94,7		
20	68,8	70,3	76,3	76,4	77,6	79,1	85,8	84,7	85,2	89,2	89,2	89,2	89,2		
30	55,1	57,2	64,9	65,6	67,1	69,1	78,6	77,4	78,1	83,9	83,9	83,9	83,9		
40	41,4	44,2	53,6	54,6	56,7	59,0	71,5	70,1	72,1	78,6	78,6	78,6	78,6		
50	28,0	31,4	42,3	44,2	46,5	49,1	64,4	62,9	64,1	73,4	73,4	73,4	73,4		
60	15,8	19,2	31,0	33,8	33,4	39,3	57,3	55,7	57,2	68,1	68,1	68,1	68,1		
70	6,7	9,0	20,7	23,8	26,7	30,0	50,2	48,6	50,3	63,1	63,1	63,1	63,1		
80	2,1	2,4	11,9	14,9	17,6	21,5	43,2	41,6	43,4	58,0	58,0	58,0	58,0		

... Cuadro 5.20.

T	MO=2,5%					MO=3,6%					MO=4,8%				
	Turba aplicada					Turba aplicada					Turba aplicada				
min	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0	80	60	40	20	0
Variación de la humedad retenida (en gramos)															
90	0,2	0,2	5,5	7,3	9,6	14,0	36,4	34,8	36,7	53,0	53,0	53,0	53,0	53,0	53,0
100	0,0	0,0	1,8	2,3	3,7	7,8	29,9	28,2	30,3	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1
110	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	3,2	23,8	21,9	24,8	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4
120	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	18,1	16,2	18,2	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
130	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,9	11,0	12,9	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4
140	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	6,7	8,3	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2
150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	3,2	4,6	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2
160	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	1,1	1,9	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
170	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,1	0,4	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
190	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
210	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	4,7	6,5	6,5	6,5	6,5
220	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	2,9	4,7	4,7	4,7	4,7
230	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	1,5	2,9	2,9	2,9	2,9
240	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,6	1,5	1,5	1,5	1,5
250	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6	0,6
260	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

El efecto de la paja de avena contenida en las mezclas sobre los cambios en la retención de humedad, se evaluó desde el punto de vista estadístico y las tendencias observadas al minuto 50, así como su significancia se presentan a continuación.

El análisis de variación realizado demostró que existen diferencias significativas (Valor $p=0.000719$) entre los tratamientos con diferentes niveles de turba, por lo que se concluye que no todos los niveles de turba estudiados producen el mismo efecto sobre la capacidad de

almacenamiento de agua de las muestras, también se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los suelos con diferentes porcentajes de MO nativa, por lo que se concluye que, no todos los porcentajes de MO nativa en los suelos producen el mismo efecto sobre la capacidad de almacenamiento de agua (Cuadro 5.21).

Cuadro 5.21. ANAVA del efecto de mezclas de turba y suelo ($M_{T:S}$) con distinta cantidad de materia orgánica nativa (M_O), sobre la retención de humedad a temperatura constante de 50°C por 50 minutos.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr(>F)
Tratamiento	1	3.846	3.846	25.2	0.000719 ***
Bloque	1	2394.3	2394.3	156.9	5.34e-07 ***
Residual	9	137.4	15.3		

Significado del código: '***' Altamente significativo ($P \leq 0.01$).

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 5.22) para los tratamientos (suelos con diferente % de turba) mostraron que los suelos con 80% y 60% de turba fueron los que retuvieron mayor capacidad de retención de humedad y fueron estadísticamente iguales, después fue mejor el suelo con 40% y por último el suelo con 20% de turba.

Cuadro 5.22. Comparación de medias para variación de la humedad por efecto de las diferentes concentración de turba al ser sometido a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.

Tratamiento	Respuesta	Grupo
	Gramos	
A	60.2	a
B	60.0	a
C	51.0	ab
D	46.2	b

Porcentaje de turba de cada tratamiento. A (80%), B (60%), C (40%), D (20%)

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 5.23) para los bloques (suelos con diferente porcentaje de materia orgánica nativa, M_O) mostraron que los suelos con 4.8% de MO tuvieron mayor capacidad de retención de humedad y fueron estadísticamente mejores, después fue mejor el suelo con 3.6% de MO nativa y por último el suelo con 2.5% de MO nativa. Esto confirma que tanto los materiales orgánicos incorporados como la MO nativa de los suelos favorecen la retención de humedad.

Cuadro 5.23. Comparación de medias para la comprobación de la variación de la humedad por efecto de diferentes proporciones de turba y distinta concentración de materia orgánica nativa (M_O) al ser sometido a 50 °C de temperatura constante por 50 minutos.

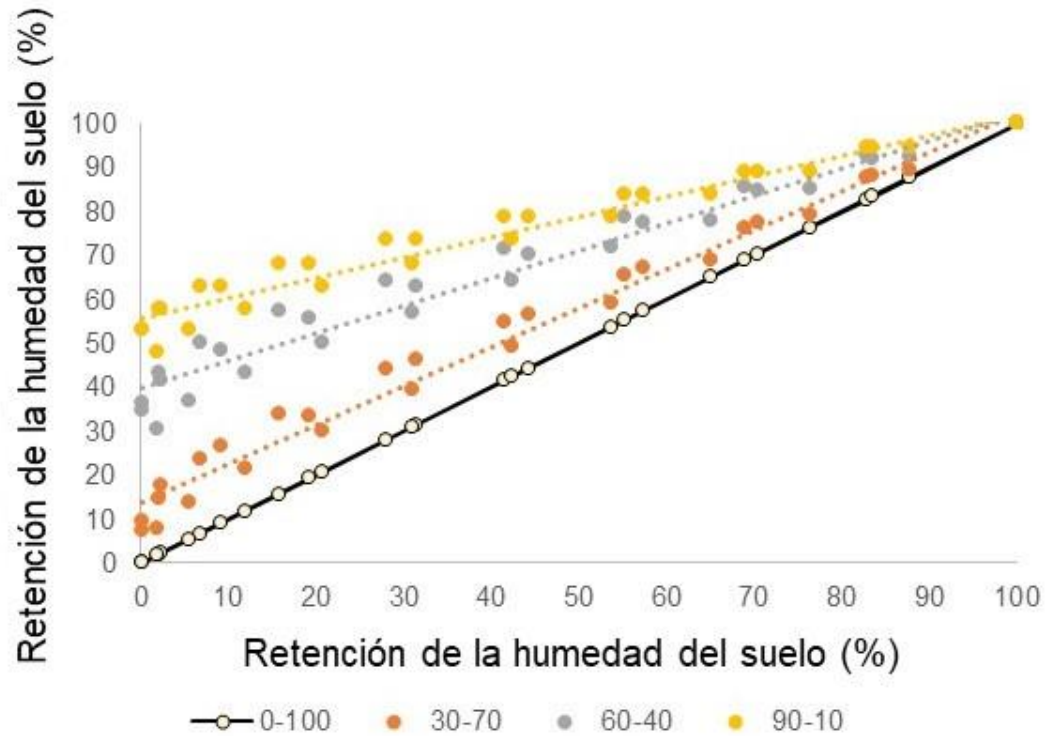
Bloque	Respuesta	Grupo
	gramos	
3	71.1	a
2	55.7	b
1	36.5	c

Porcentaje de M_O: 1 (2.5%), 2 (3.6%), 3 (4.8%)

Estos resultados confirman la mejora de la retención de humedad de los suelos tratados con turba y también conforman el efecto esperado, que la MO nativa del suelo también favorece la retención de humedad y que fue enmascarado en el experimento con paja anteriormente presentado.

La variación en la disponibilidad de la humedad en todos los casos es muy evidente, puesto que a medida que se incrementa la cantidad de turba presente en cada uno de los tratamientos que se evaluaron la retención de la humedad también fue mayor, representada tanto por el peso inicial de hidratación, como por el tiempo al que se llega a peso constante al término del estudio de la termogravimetría.

Los hallazgos en comento se hacen más evidentes en la Figura 5.15, en la cual se presenta una comparación entre las tendencias generadas por la disminución de la retención de humedad a diferentes proporciones de la mezcla de turba con el suelo, usando como contraste lo que ocurre cuando se analizó el suelo sin la adición ex profeso de materiales orgánicos.



Cuadro 5.24. Comparación de la variación de la retención de humedad a diferentes proporciones de la mezcla de turba con el suelo, tomando como referencia la modificación de dicha variable observada en el suelo sin adición del material orgánico (línea sólida).

En la figura en discusión, se toma como referencia lo que ocurre con el suelo sin aplicar materiales orgánicos en cuanto a la retención de la humedad y se compara con los diferentes tratamientos evaluados. De esta manera, toda la dispersión de los puntos experimentales se encuentra por encima de la línea continua, que representa al suelo solo, lo que indica que la adición en este caso de turba repercutirá sobre una mayor capacidad de retención de humedad en el suelo y, mientras mayor sea la dosis empleada, el agua en el medio edáfico se verá incrementada.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación demuestran que la humedad del suelo es función del contenido de arcillas y de la materia orgánica nativa del suelo; también los hallazgos sugieren, que en general todos los materiales orgánicos favorecen la capacidad de retención de humedad del suelo, sin embargo, los efectos de algunos son más notorios que de otros, esto se debe a las diferencias inherentes a cada material.

CAPITULO VII. LITERATURA CITADA

- Altland, J., & Lanthier, M. (2007). Influence of Container Mulches on Irrigation and Nutrient Management. *J. Environ. Hort.*, 25, 234–238.
- Amoroso, G., Frangi, P., Piatti, R., Fini, A., & Ferrini, F. (2010). Effect of mulching on plant and weed growth, substrate water content, and temperature in container-grown giant arborvitae. *HortTechnology*, 20(6), 957–962.
- Aranyos, J. T., Tomócsik, A., Makádi, M., Mészáros, J., & Blaskó, L. (2016). Changes in physical properties of sandy soil after long-term compost treatment. *International Agrophysics*, 30(3), 269–274. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0003>
- Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153–160. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)
- Aschenbach, T. A., Brandt, E., Buzzard, M., Hargreaves, R., Schmidt, T., & Zwagerman, A. (2012). Initial plant growth in sand mine spoil amended with peat moss and fertilizer under greenhouse conditions: Potential species for use in reclamation. *Ecological Restoration*, 30(1), 50–58. <https://doi.org/10.3368/er.30.1.50>
- Balaeva, Y. S., Miroshnichenko, D. V., & Kaftan, Y. S. (2017). Moisture-holding capacity of coals. *Solid Fuel Chemistry*, 51(6), 337–348. <https://doi.org/10.3103/S0361521917060027>
- Barros, N., Salgado, J., & Feijóo, S. (2007). Calorimetry and soil. *Thermochimica Acta*, 458(1–2), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.01.010>
- Berretta, C., Poë, S., & Stovin, V. (2014). Reprint of “Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics.” *Journal of Hydrology*, 516, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.001>
- Brocca, L., Tullo, T., Melone, F., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2012). Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *Journal of Hydrology*, 422–423, 63–75.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.039>

- Celik, I., Ortas, I., & Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.012>
- Costa, A. C. S., Bigham, J. M., Tormena, C. A., & Pintro, J. C. (2004). Clay mineralogy and cation exchange capacity of Brazilian soils from water contents determined by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 413(1–2), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.10.009>
- Dell'Abate, M. T., Benedetti, A., & Sequi, P. (2000). Thermal methods of organic matter maturation monitoring during a composting process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 61(2), 389–396. <https://doi.org/10.1023/A:1010157115211>
- Emami, H., & Astarai, A. R. (2012). Effect of organic and inorganic amendments on parameters of water retention curve, bulk density and aggregate diameter of a saline-sodic soil. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(SUPPL.), 1625–1636.
- Hu, C., Zheng, C., Sadras, V. O., Ding, M., Yang, X., & Zhang, S. (2018). Effect of straw mulch and seeding rate on the harvest index, yield and water use efficiency of winter wheat. *Scientific Reports*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26615-x>
- Kleber, M., Sollins, P., & Sutton, R. (2007). A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry*, 85(1), 9–24. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5>
- Kučerík, J., Tokarski, D., Demyan, M. S., Merbach, I., & Siewert, C. (2018). Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen. *Geoderma*, 316(September 2017), 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.001>
- Leu, J.-M., Traore, S., Wang, Y.-M., & Kan, C.-E. (2010). The effect of organic matter amendment on soil water holding capacity change for irrigation water saving: Case study in Sahelian environment of Africa. *Scientific Research and Essays*, 5(23), 3564–3571.
- Li, H., Parent, L. E., Karam, A., & Tremblay, C. (2004). Potential of Sphagnum peat for

- improving soil organic matter, water holding capacity, bulk density and potato yield in a sandy soil. *Plant and Soil*, 265(1–2), 355–365. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0753-6>
- Murphy, B. W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties - A review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605–635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
- Ordóñez, I., López, I. F., Kemp, P. D., Descalzi, C. A., Horn, R., Zúñiga, F., ... Dörner, J. (2018). Effect of pasture improvement managements on physical properties and water content dynamics of a volcanic ash soil in southern Chile. *Soil and Tillage Research*, 178(May 2017), 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.013>
- Padovan, M. P., Brook, R. M., Barrios, M., Cruz-Castillo, J. B., Vilchez-Mendoza, S. J., Costa, A. N., & Rapidel, B. (2018). Water loss by transpiration and soil evaporation in coffee shaded by *Tabebuia rosea* Bertol. and *Simarouba glauca* dc. compared to unshaded coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.036>
- Plante, A. F., Fernández, J. M., & Leifeld, J. (2009). Application of thermal analysis techniques in soil science. *Geoderma*, 153(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.016>
- Ramos, M. C. (2017). Effects of compost amendment on the available soil water and grape yield in vineyards planted after land levelling. *Agricultural Water Management*, 191, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.013>
- Rosegrant, M. W., & Cline, S. A. (2003). Global Food Security: Challenges and Policies. *Science*, 302(5652), 1917–1919. <https://doi.org/10.1126/science.1092958>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., ... Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>

- Siewert, C. (2004). Rapid Screening of Soil Properties using Thermogravimetry. *Soil Science Society of America Journal*, 68(5), 1656. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1656>
- Sinica, A. P. (2018). 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响*, (20150203004).
- Tenhaken, R. (2015). Cell wall remodeling under abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 5(January), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00771>
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., ... Kögel-Knabner, I. (2018). Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 104–136. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Wang, Y., Lu, S., Ren, T., & Li, B. (2011). Bound Water Content of Air-Dry Soils Measured by Thermal Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2), 481. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0065>
- Yan-Long, L., Tie-Hang, W., & Li-Jun, S. (2015). Determination of bound water content of loess soils by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis. *Soil Science*, 180(3), 90–96. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000121>