COMPOSTA DE ESTIÉRCOL BOVINO Y SU EFECTO EN PLANTAS DE COBERTURA Y PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Por

Diana Patricia Buitrago Escobar

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS
En
AGRONOMÍA

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2017
Aprobado por:

Elide Valencia, Ph.D. Presidente del Comité Graduado	Fecha
Winston de la Torre, Ph.D. Miembro del Comité Graduado	Fecha
Hugo E. Cuevas, Ph.D. Miembro del Comité Graduado	Fecha
Rebecca Tirado Corbalá, Ph.D. Miembro del Comité Graduado	Fecha
Arelys Fernández, M.I.S. Representante de Estudios Graduados	Fecha
Elvin Román Paoli, Ph.D. Director del Departamento	Fecha

ABSTRACT

Experiments were conducted to determine the effect of dairy manure compost (DMC) in nutrient concentrations in soil and cover crops (CC). In the first study, 60 Mg ha^{-1} of DCM on the CC: forage radish [*Raphanus sativus* (FR)] and triticale [X. *Triticosecale* Wittmack (TR)] was tested. Both CC were seeded with base substrate (DCM mixture with Coto series soil) at a seed density of 13 and 125 kg ha^{-1} for FR and TR, respectively. For this study, a randomized complete block design (RCBD) with four replications was used. Both CC were harvested two months after planting to determine P and N concentration. Data were analyzed using an analysis of variance with the SAS (Statistical Analysis System). There was no significant difference ($P > 0.05$) for N (3.87%) between CC. However, the concentration of P was higher ($P < 0.05$) in TR (0.67%) than in RF (0.49%) with DCM application. A follow-up evaluated 0, 5, 15 and 40 Mg ha^{-1} of DMC. Data were analyzed using SAS and Infostat. There was quadratic effect ($P<0.05$) for P concentration on TR, but there was no dose effect on N and P in FR. However, higher N content (3.70%) was obtained in RF than in RT (2.75%). In conclusion, adding 60 Mg ha^{-1} of DCM shows a higher concentration of P in TR compared to FR. Although a quadratic response was observed for P in triticale, N (3.70%) and P (0.62%) concentration in FR was greater than in TR (2.75% and 0.38% for N and P, respectively. For this reason, FR as a CC was recommended for field evaluations. In the second experiment, the effect of 0, 10, 20 and 40 Mg ha^{-1} of DMC on dry matter yield (DMY), N and P concentration in shoots and roots of FR and ammonium concentrations (NH_4^+ - N), nitrate (NO_3^- - N), organic matter (OM), pH, P, K and Ca in the soil were assessed. Studies were carried out from January to May 2016 at the Agricultural Experiment Station (AEE) of Isabela on a Oxisol of the Coto series and between August to December 2016 at the Farm Alzamora of the Campus of Mayagüez, on an Ultisol of the Consumo series. A RCBD with four replications was used in a split-plot arrangement (main plot was the CC seeded at 13 kg ha^{-1}) and without FR and the subplots were the four DCM levels. In the Ultisol, another treatment was added (FR was planted immediately after DCM application and one month after DCM application). Two months after FR sowing, samples were taken in a 0.25m^2 area, separating the aerial part (shoots) and the roots (tuber). The tissue samples were dried, milled and analyzed for N using the Kjeldahl method and the P was extracted following the Dry

Ashing method and quantified with an Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Soil samples were taken at 15-cm depth where the FR was incorporated and where only DMC was incorporated. Soil samples were dried, milled and analyzed for N (steam distillation method), OM (Walkley Black method), pH and macronutrients (Mehlich III). Due to soil differences and the post-application of DMC and planting of FR on the Ultisol, the effects were analyzed and discussed separately. Nutrient concentration on the tissues and soil were analyzed using SAS 9.4 mean separation with Fisher LSD ($P<0.05$). To measure the response to DMC levels, polynomial contrasts and regression analysis were performed. Greater DMY was found on shoots (5,345 kg ha^{-1}) compared to the roots (977 kg ha^{-1}). Nutrient concentrations were: 2.05 g kg^{-1} and 0.87 kg^{-1} P, and 24.4 g kg^{-1} and 21.7 g kg^{-1} for N. Nutrient uptake was 10.2 kg P ha^{-1} and 0.86 kg P ha^{-1}, and 129 kg N ha^{-1} and 21.4 kg N ha^{-1} for the shoots and roots, respectively. On the Ultisol, a higher concentration of P (5.67 g P kg^{-1}) was found in FR when sowed immediately after DMC application (SieRaEst) compared to when sowed one month after (SieRaEsInc1m) (4.74 g P kg^{-1}). A similar response was found for Ca concentration of 10.1 g kg^{-1} and 3.24 g kg^{-1} and Ca uptake 11.6 kg ha^{-1} and 4.6 kg ha^{-1} for FR in (SieRaEst) and (SieRaEsInc1m) respectively. In the Oxisol, a higher concentration of N-NO_3 (36.2 mg kg^{-1}) was found when FR was incorporated than when CC was not used (12.43 mg kg^{-1}). Application of 40 Mg ha^{-1} of DMC increase the concentration of P (65.29 mg kg^{-1}), Ca (456 mg kg^{-1}) and OM (2.45%). These concentrations were significantly different when no manure were applied, P (21.2 mg kg^{-1}), Ca (278 mg kg^{-1}) and OM (2.01%). In the Ultisol, 40 Mg ha^{-1} showed higher DMY (2,080 kg ha^{-1}) also affecting the nutrient uptake in the FR tissue 10.7 kg P ha^{-1}, 29.0 kg N ha^{-1}, 12.4 kg Ca ha^{-1} and 24.6 kg B ha^{-1}, being significantly different from the other rates. High N uptake FR tissue (129 kg ha^{-1}) was observed in Oxisol, which demonstrates its ability to trap and retain nutrients by reducing their loss to the environment. In the Ultisol, DMY was less than in the Oxisol and could not be separated by shoots and roots since the tuber was not formed. In addition, a lower N concentration was obtained, but a higher P concentration and uptake than in an Oxisol was evidenced. The time of application of manure had only effect for K in the soil, being less when FR was sown one month after incorporation of DMC (379 mg kg^{-1}). Sowing FR is not recommended a month after the application of

DMC. Sow FR immediately after the application of DMC improves nutrient uptake improving the chemical properties of the soil and minimizing loss to the environment.

RESUMEN

Se realizaron experimentos para determinar el efecto de la composta de estiércol de vaquería (CEV) en las concentraciones de nutrientes en el suelo y plantas de cobertura (PC). En el primero, se evaluó el efecto de la aplicación de 60 Mg ha^{-1} de CEV en las PC: rábano [*Raphanus sativus* (RF)] y triticale [X. *Triticosecale* Wittmack (TR)]. Se sembraron ambas PC en tiestos con sustrato base (mezcla de CEV con suelo serie Coto) a una densidad de siembra de 13 y 125 kg ha^{-1} para RF y TR, respectivamente. Se utilizó un Diseño en Bloques Completos Aleatorizados (DBCA) con cuatro repeticiones. Ambas PC se cosecharon dos meses después de siembra para determinar concentración de P y N en el tejido seco. La data se sometió a un análisis de varianza con el paquete estadístico SAS. No se encontró diferencia significativa ($P > 0.5$) para N (3.87 %) entre las PC luego de aplicar 60 Mg ha^{-1} de CEV. La concentración de P fue más alta ($P < 0.05$) en TR (0.67%) que en RF (0.49%) con CEV. Este estudio se repitió usando cuatro dosis de CEV 0, 5, 15 y 40 Mg ha^{-1}. Los datos fueron analizados utilizando SAS y regresión con el paquete estadístico Infostat. Se encontró un efecto cuadrático sobre la concentración de P para TR, pero no hubo un efecto de dosis sobre la concentración de N y P en RF. Sin embargo, se obtuvo mayor contenido de N (3.70%) en RF que en TR (2.75%). En conclusión, 60 Mg ha^{-1} de CEV presenta mayor concentración de P en TR en comparación con RF. Aunque se observó una respuesta cuadrática para P en triticale, la concentración de N (3.70%) y P (0.62%) en RF fue mayor que TR (2.75% y 0.38%) para N y P, respectivamente. Por esta razón, se recomienda el RF como PC para evaluaciones de campo. En el segundo experimento se determinó el efecto de 0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1} de CEV sobre el rendimiento de materia seca (RMS), concentración de N y P en tejidos y tubérculos del RF y concentraciones de amonio (NH_4^+-N), nitrato (NO_3^--N), materia orgánica (MO), pH, P, K, Mg y Ca en el suelo. Los estudios se llevaron a cabo de enero a mayo 2016 en la Estación Experimental Agrícola (EEA) de Isabela en un Oxisol de la serie Coto y entre agosto y diciembre 2016 en la Finca Alzamora del Recinto Universitario de Mayagüez, en un Ultisol de la serie Consumo. Se utilizó un DBCA con cuatro repeticiones en un arreglo de parcelas divididas donde la parcela principal fue la PC con RF (densidad de siembra de 13 kg ha^{-1}) y sin rábano y las sub-parcelas fueron los cuatro niveles de CEV (0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1}). En el Ultisol, se añadió otro tratamiento (siembra de RF inmediatamente

después de la aplicación de CEV y siembra un mes después de aplicación de CEV). Dos meses después de la siembra de RF, se tomaron muestras en un área de 0.25m^2 separando la parte aérea (vástago) y la raíz (tubérculo). Las muestras de tejido se secaron, molieron y analizaron para N utilizando el método de Kjeldahl y el P se extrajo siguiendo la metodología de Incineración en Seco y se cuantificó por espectroscopia de plasma. Muestras de suelos fueron tomadas a 15-cm de profundidad donde se incorporó el RF y donde solo se tenía CEV incorporado. Las mismas fueron secadas, molidas y analizadas para N (método de destilación de vapor), MO (método Walkley Black), pH y macronutrientes (Mehlich III). Debido a diferencia de suelos y factor de siembra de rábano post-aplicación CEV en el Ultisol, los resultados se analizaron y discutieron por separado. La concentración de nutrientes en los tejidos y el suelo fueron analizados con el programa estadístico SAS 9.4 ($P< 0.05$) y la separación de media con LSD Fisher. Para medir la respuesta a niveles de CEV se hicieron contrastes polinomiales y análisis de regresión. Se encontró mayor RMS en el vástago (5,345 kg ha^{-1}) en comparación con la raíz (977 kg ha^{-1}). Las concentraciones de nutrientes para tejido fueron: P 2.05 g kg^{-1} y 0.87 g kg^{-1} y para N fue de 24.4 g kg^{-1} y 21.7 g kg^{-1}. La absorción de nutrientes fue de 10.2 kg P ha^{-1} y 0.86 Kg P ha^{-1}, y 129 kg N ha^{-1} y 21.4 kg N ha^{-1} para el vástago y raíz, respectivamente. En el Ultisol, se encontró mayor concentración de P (5.67 g P kg $^{-1}$) en los tejidos de RF cuando se sembró inmediatamente después de aplicar el CEV (SieRaEst) en comparación cuando se sembró un mes después de haber aplicado el CEV (SieRaEsInc1m) (4.74 g P kg $^{-1}$). Respuesta similar se encontró para concentración de Ca 10.1 g kg $^{-1}$ y 3.24 g kg $^{-1}$ y absorción de Ca 11.6 kg ha^{-1} y 4.6 kg ha^{-1} para el RF en SieRaEst y SieRaEsInc1m, respectivamente. En el suelo Oxisol se encontró mayor concentración de N-NO_3 (36.2 mg kg^{-1}) cuando se incorporó RF que cuando no se usó la PC (12.43 mg $^{-}$kg^{-1}). Aplicación de 40 Mg ha^{-1} de CEV aumenta la concentración de P (65.29 mg kg^{-1}), Ca (456 mg kg^{-1}) y MO (2.45%) en el Oxisol. Estas concentraciones fueron significativamente diferentes cuando no se aplicó estiércol, P (21.2 mg kg^{-1}), Ca (278 mg kg^{-1}) y MO (2.01%). En el Ultisol, 40 Mg ha^{-1} evidencia mayor RMS (2,080 kg ha^{-1}) afectando también la absorción de nutrientes en el tejido de RF 10.7 kg P ha^{-1}, 29.0 kg N ha^{-1}, 12.4 kg Ca ha^{-1} y 24.6 kg B ha^{-1}, siendo significativamente diferente a las demás dosis. Se evidenció alta absorción de N en el tejido del rábano (129 kg ha^{-1}) en Oxisol, lo cual demuestra su capacidad para atrapar y retener el nutriente reduciendo su pérdida al ambiente. En el Ultisol, se

presentó menor RMS de RF que en Oxisol y no se pudo separar por vástago y raíz ya que no se formó el tubérculo. A su vez, se obtuvo menor concentración de N, pero se evidencia mayor concentración y absorción P que en un suelo Oxisol. El tiempo de aplicación de estiércol solo tuvo efecto para K en el suelo encontrándose menor concentración cuando se siembra el RF después de un mes de incorporado estiércol (379 mg kg^{-1}). No se recomienda sembrar el RF un mes después de la aplicación de estiércol, por el contrario, sembrar el RF inmediatamente después de la aplicación de estiércol mejora la absorción de los nutrientes evitando que se pierdan al ambiente y se mejoran las propiedades químicas del suelo.

DEDICATORIA

A mis padres, hermana y todas las bonitas personas que Dios ha puesto en mi camino, que han confiado en mí, me han apoyado, ayudado, enseñado y finalmente me han hecho una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Puerto Rico por darme la oportunidad de estudiar en su Recinto y formarme como profesional.

Al Doctor Elide Valencia por su apoyo, enseñanza y guía durante el proceso académico.

A los miembros del comité graduado Rebecca, Hugo y Winston por su tiempo y dedicación en el desarrollo de la investigación.

A la estación de investigación en agricultura tropical (TARS) y especialmente a Delvis Pérez por permitirme y guiarme para realizar los análisis de laboratorio en su institución.

A todos los profesores por su conocimiento, guía y formación profesional durante las clases.

Al departamento de Ciencias Agroambientales por su colaboración en los procesos formales.

Al departamento de Biología y sus coordinadores de laboratorio por su apoyo guía en mi proceso como ayudante de cátedra.

A todos mis compañeros y amigos por su apoyo, momentos compartidos, las alegrías y su amistad.

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT II

RESUMEN V

DEDICATORIA VIII

AGRADECIMIENTOS IX

TABLA DE CONTENIDO X

LISTA DE TABLAS XII

LISTA DE FIGURAS XIII

LISTA DE ABREVIATURAS XIV

1 INTRODUCCIÓN 1

2 OBJETIVOS 5

2.1.1 Objetivo General 5

3 REVISIÓN DE LITERATURA 6

3.1.1 Uso de plantas de cobertura para mejorar el suelo 6
3.1.2 Rábano (Raphanus sativus L.) 7
3.1.3 Triticale (X. Triticosecale Wittmack) 8
3.1.4 Fertilización Orgánica 9
3.1.5 Descomposición de materia Orgánica 10

4 EXPERIMENTO I. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE P Y N EN RÁBANO (RAPHANUS SATIVUS L) Y TRITICALE (XTRITICOSECALE WITTMACK) CON APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO BAJO CONDICIONES DE UMBRÁCULO 11

4.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS 11
4.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos 11
4.1.3 Concentración de P y N en rábano y triticale 11
4.1.4 Análisis estadístico 12
4.1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 13
4.1.6 Experimento I 13
4.1.7 Concentración de nutrientes en rábano y triticale con una dosis de aplicación de estiércol 60 Mg ha^{-1}. 13
4.1.8 Concentración de nutrientes en rábano y triticale con cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 5, 15 y 40 Mg ha^{-1}. 14
4.1.9 CONCLUSIONES 16

5 EXPERIMENTO II. EVALUACIÓN DE RÁBANO (RAPHANUS SATIVUS L) EN UN OXISOL EN CONDICIONES DE CAMPO BAJO CUATRO NIVELES DE APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO 17

5.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS 17
5.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos 17
5.1.3 Preparación del terreno y diseño experimental 17
5.1.4 Procesamiento de las muestras de rábano 18
5.1.5 Análisis de suelo 18
5.1.6 Análisis estadístico 19
5.1.7 Resultados y discusión 19
5.1.8 Experimento II 19
5.1.9 Análisis de tejido de rábano en un suelo Oxisol bajo cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1} 19
5.1.9.1 Análisis de suelo con aplicación de estiércol más la incorporación de la planta de cobertura y suelo con estiércol sin la incorporación de planta de cobertura 23
5.1.10 Conclusiones 30

6 EXPERIMENTO III. EVALUACIÓN DE RÁBANO (RAPHANUS SATIVUS L) EN UN ULTISOL EN MAYAGÜEZ BAJO CUATRO NIVELES DE APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO 31

6.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS 31
6.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos 31
6.1.3 Preparación del terreno y diseño experimental 31
6.1.1 Procesamiento de las muestras de rábano 32
6.1.2 Análisis de suelo 32
6.1.3 Análisis estadístico 33
6.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 33
6.1.5 Experimento III 33
6.1.6 Análisis de tejido de rábano en un suelo Ultisol bajo cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1} 33
6.1.6.1 Análisis de suelo con aplicación de estiércol y siembra directa de rábano y siembra de rábano con un mes después de incorporado el estiércol 43
6.1.7 CONCLUSIONES 50

7 ANEXOS 51

8 LITERATURA CITADA 52

LISTA DE TABLAS

Tablas **Página**

Tabla 1. Efecto de aplicación de estiércol bovino en el contenido de nitrógeno y fósforo en rábano (*Raphanus sativus* L.) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack)..... 13
Tabla 2. Efecto de aplicación de cuatro niveles de estiércol bovino en el contenido de nitrógeno y fósforo en rábano (*Raphanus sativus* L.) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack) 14
Tabla 3. Efecto de dosis de aplicación de estiércol sobre rendimiento, concentración y absorción de fósforo y nitrógeno en el vástago y raíces de rábano (Raphanus sativus L.) .. 21
Tabla 4. Efecto de contrastes para la concentración y absorción de fósforo y nitrógeno con cuatro dosis de aplicación de estiércol. 22
Tabla 5. Efecto de la interacción de dosis x tratamiento ((SuSolEst) y (SuEstRF)). En la concentración de nutrientes y pH en el suelo. 24
Tabla 6. Efecto de cuatro dosis de aplicación de estiércol sobre la concentración de macronutrientes en suelo con solo estiércol (SuSolEst) y en el suelo con incorporación de la planta cobertora rábano *Raphanus sativus* L. (SuEstRF) 25
Tabla 7. Efecto de las dosis de aplicación de estiércol sobre la concentración de macronutrientes en suelo (SuSolEst) y suelo con cuatro dosis de estiércol más incorporación de la planta cobertora *Raphanus sativus* L. (SuEstRF). 26
Tabla 8. Efecto de dosis de estiércol sobre rendimiento, concentración y absorción de nitrógeno y fósforo en dos tiempos de siembra de rábano (*Raphanus sativus* L). 35
Tabla 9. Efectos de la interacción dosis * época de siembra (siembra directa (SD) y siembra un mes después de incorporado el estiércol (SI) sobre para absorción de Ca en rábano (*Raphanus sativus* L) 37
Tabla 10. Contrastes para rendimiento, concentración y absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca) y boro (B) para rábano (*Raphanus sativus* L) sembrado inmediatamente después de aplicación de estiércol y sembrado un mes después de aplicación de estiércol . 38
Tabla 11. Efecto de las dosis de aplicación de estiércol y la incorporación de planta cobertora rábano (*Raphanus sativus* L) en la concentración de nutrientes en el suelo con diferentes tiempos de incorporación..... 45
Tabla 12. Efecto de dosis de aplicación de estiércol sobre las concentraciones de Calcio, Magnesio, pH y % de materia orgánica en el suelo en tres tiempos de incorporación de estiércol y planta de cobertura. 46
Tabla 13. Características del análisis de suelo hecho al estiércol aplicado en Isabela y Alzamora y el suelo analizado en ambos lugares antes de realizar el experimento. 51
Tabla 14. Niveles críticos de P en el suelo con los cueles se puede inferir su concentración en agua 51

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

Figura 1. Relación tipo cuadrática entre la concentración de fósforo en los tejidos de triticale y cuatro dosis de aplicación de estiércol. 15
Figura 2. Regresión para concentración de fósforo en el tejido de rábano Raphanus sativus L, para raíz y vástago. 23
Figura 3. Relación lineal para N-NO_3 con el tratamiento solo estiércol y relación cuadrática para N-NH_4 con el tratamiento estiércol y rábano incorporado al suelo. 27
Figura 4. Relación lineal para fósforo en los dos tratamientos sin cobertora (SuSolEst) y con cobertora (SuEstRF), K y Mg en tratamiento sin cobertora (SuSolEst). 28
Figura 5. Relación lineal para % MO con incorporación de la planta cobertora (SuEstRF). 29
Figura 6. Relación lineal para pH del suelo con solo estiércol (SuSolEst). 29
Figura 7. Rendimiento de materia seca en dos etapas de siembra de RF y cuatro dosis de aplicación de estiércol. 39
Figura 8. Absorción de fósforo en dos etapas de siembra de RF y cuatro dosis de aplicación de estiércol. 40
Figura 9. Absorción de nitrógeno en rábano con dos etapas de siembra y cuatro dosis de aplicación de estiércol. 40
Figura 10. Absorción de calcio en rábano con el tratamiento S.D- SieRaEst 41
Figura 11. Absorción de boro en rábano con el tratamiento SD-SieRaEst y SI-SimRaestInc1m en cuatro dosis de aplicación de estiércol. 41
Figura 12. Relación lineal para concentración de fósforo en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos. 44
Figura 13. Relación lineal para concentración de potasio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos 47
Figura 14. Relación lineal para concentración de Calcio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos 47
Figura 15. Relación lineal para concentración de Magnesio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos. 48
Figura 16. Relación lineal para pH con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos 48
Figura 17. Relación lineal para porcentaje de materia orgánica con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos 49

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ANOVA	Analysis Of Variance
B	Boro
Ca	Calcio
CEV	Composta de estiércol de vaquería
DBCA	Diseño en bloques completos aleatorizados
EEA	Estación experimental Agrícola
SuEsRF	Suelo con estiércol y rábano Forrajero incorporado
K	Potasio
Mg	Magnesio
MO	Materia orgánica
N	Nitrógeno
NO_3^-	Nitrato
NH_4^+	Amonio
P	Fósforo
RF	Rábano Forrajero
SAS	Statistical Analysis System
SieRaEst	Siembra de rábano con estiércol aplicado
SuEnSieRaEst	Suelo con siembra de rábano después de aplicar estiércol
SuSolEst	Suelo solo con estiércol
SuEstInc1m	Suelo con estiércol incorporado de un mes
SuEstInc1myRFInc	Suelo con estiércol incorporado de un mes y rábano incorporado
SieRaEsInc1m	Siembra de rábano con un mes de incorporado el estiércol

TR	Triticale
TARS	Tropical Agriculture Research Station

©Diana Patricia Buitrago Escobar, 2017

1 INTRODUCCIÓN

Las prácticas agrícolas hacen cada vez más un uso intensivo del suelo, ocasionándole degradación, pérdidas de biodiversidad y de fertilidad. Con el fin de aumentar el rendimiento de los cultivos y así suplir la demanda de alimentos de la población mundial, la agricultura convencional ha dependido del uso excesivo de fertilizantes inorgánicos y plaguicidas.

Actualmente las prácticas ganaderas junto con las prácticas agrícolas son una de las principales fuentes de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que se generan restos de pesticidas, fertilizantes, remanentes orgánicos de animales y plantas llegando a afectar notablemente la calidad del agua (Barba, 2002). Las zonas de pastoreo en las vaquerías están generalmente ubicadas cerca a fuentes de aguas, lo cual aumenta la probabilidad de que las aguas superficiales sean enriquecidas con fósforo (P) y nitrógeno (N), proveniente del estiércol de los animales. Igualmente, mayor utilización de fertilizantes con N, P y potasio (K) ha llevado a que se incremente este tipo de contaminación en las fuentes de agua (Cardona, 2003).

Los nutrientes contenidos en el estiércol pueden ser reciclados, aplicando los residuos correctamente en tierras agrícolas, sin embargo, el exceso también puede ser una importante fuente de contaminación. Los fertilizantes que no son absorbidos en su totalidad por las plantas se pueden perder por escorrentía y lixiviación llegando a las fuentes de agua provocando eutrofización (Barba, 2002; Mullins, 2009). En Holanda, el estiércol aplicado a los cultivos excede la capacidad de usar y retener estos nutrientes ya que solo el 30 a 35% de P aplicado es absorbido por las cosechas (Dietz, 1991). Una acumulación de P en suelos tratados con estiércol resulta cuando este se aplica para suplir las necesidades de N de un cultivo, ya que existe un desbalance entre lo que se aplica y los requerimientos nutricionales anuales de los cultivos. La mayoría del estiércol animal tiene cantidades similares de P y N pero las plantas absorben de 2.4 a 4.5 veces más N que P, encontrándose este último en una concentración de 0.1 a 0.5 % en los tejidos de las plantas en base seca (Mullins, 2009).

Las pérdidas de P del suelo ocurren cuando hay remoción a través de las cosechas, escorrentía, erosión y lixiviación. La magnitud de la pérdida de P va a depender del tipo y manejo de suelo, cultivo, sistema de labranza, la pendiente, cantidad e intensidad de las precipitaciones, método y aplicación de estiércol y nivel de P en el suelo (Mullins, 2009).

El análisis de P en el suelo se hace generalmente para predecir la posible respuesta de un cultivo a la aplicación de fertilizante, más no para predecir las pérdidas por escorrentía. Pero, suelos con alto contenido de P aumentan el potencial de pérdida del mismo (Mullins, 2009). En un estudio realizado en Puerto Rico en un suelo del orden Ultisol se determinó que el valor crítico de P para evaluación ambiental esta entre 176-296 mg Kg^{-1} (usando el método de extracción Olsen) y 143-276 mg Kg^{-1} (usando el método de extracción Bray1). Este valor crítico indica la concentración de P en el suelo por encima de la cual tiene más riesgo a perderse por escorrentía y causar eutrofización en las fuentes de agua (Ramírez et al. 2011). Usando el método Mehlich III el valor crítico ambiental para P está considerado como alto con una concentración de 167 mg Kg^{-1} cuando fueron analizados varios suelos del trópico y subtrópico (Sotomayor et al., 2004). Adoptando algunas prácticas de manejo tales como control de la erosión, labranza de conservación, zonas de amortiguamiento y zonas ribereñas permiten disminuir las pérdidas de P por erosión y escorrentía superficial (Mullins, 2009).

El P es un elemento esencial para las plantas ya que cumple varias funciones importantes como la fotosíntesis, respiración, división celular, almacenamiento y transferencia de energía, además es importante para el crecimiento y formación de la raíz. Los animales también necesitan P para su crecimiento adecuado además de ser un componente en huesos y dientes (Mullins, 2009). En un estudio realizado en vaquerías de Puerto Rico se encontró que el P soluble correspondía de un 20 a 30% del P total, lo cual se considera bajo ya que el P soluble es aquel que está disponible para contribuir a la eutrofización. Sin embargo, en la dieta de los animales se tenía una fuente alta de P, aproximadamente el 53% del P total en las heces resulta del uso excesivo de concentrados concluyendo que un incremento de P en la dieta animal aumenta la concentración de P en el estiércol (Ruiz et al., 2016).

En general, la tasa de pérdida de nutrientes a partir de los fertilizantes y estiércoles hacia el agua está influenciada por la dosis, la forma química, método de aplicación, la

cantidad y tiempo de lluvias después de la aplicación y la cobertura de la vegetación. Las pérdidas P y N son más altas cuando provienen de estiércol que de los fertilizantes inorgánicos, debido al mayor contenido de P y N presente en el estiércol. También una menor flexibilidad en las fechas de aplicación de estiércol aumenta la pérdida, ya que el estiércol debe ser trabajado en el suelo antes o después de la estación de crecimiento y no en el momento en que los cultivos requieran P y N (Carpenter et al., 1998).

Los problemas ambientales causados por estiércol se agrupan en tres categorías principales: 1- emisiones de fosfatos (HPO_4^{-2}, $H_2PO_4^-$) a aguas superficiales; 2- contaminación por nitratos (NO_3-N) de aguas subterráneas; y 3- acidificación causada por amoniaco (NH_3). En países donde el agua potable es de origen subterráneo, el continuo deterioro de aguas superficiales aumenta la importancia de conservar las aguas subterráneas ya que altos niveles de fertilización nitrogenada en la agricultura aumentan la concentración de NO_3-N en aguas subterráneas (Dietz, 1991). Una alta concentración de NO_3-N en el agua potable puede traer consecuencias graves para la salud como cianosis congénita en menores de seis meses, lo cual puede causar la muerte si no se tratan debidamente. La agencia de protección ambiental [Envirometal Protection Agency (EPA)] estableció 10 ppm como el valor crítico permitido de niveles de NO_3-N en agua potable (EPA, 2016).

El término eutrofización es utilizado para describir los efectos biogeofísicos en un ecosistema acuático a causa de una abundancia anormal de nutrientes, especialmente de N y P (Red de acción en plaguicidas y sus alternativas para América Latina [RAPAL], 2010). La eutrofización causa un aumento de proliferación de algas unicelulares, cianobacterias y macrófitas las cuales provocan que el agua se enturbie impidiendo el paso de luz a una mayor profundidad. La falta de luz afecta la fotosíntesis reduciendo la producción de oxígeno creando gradualmente un ambiente anaerobio. De igual forma se aumenta la concentración de gases como anhídrido sulfuroso, metano y anhídrido carbónico, haciendo inviable la forma de vida de la mayoría de las especies que forman el ecosistema acuático, dándose una mortandad de la biota en general. Además, la bioacumulación de sustancias tóxicas y un aumento de sedimentación en los cuerpos de agua reducen su vida útil e incrementa la aparición de organismos patogénicos y vectores de enfermedad (Carpenter et al., 1998; Mullins, 2009; RAPAL, 2010; Sheffield et al., 2008).

Actualmente se han propuesto tres alternativas para reducir el problema de sobre fertilización con estiércol: 1) reducir el contenido en la alimentación animal de P y N, 2) transportar el exceso de estiércol a las zonas con deficiencia y 3) desarrollar plantas de tratamiento de abonos (Dietz, 1991). Además, existen otras prácticas agrícolas que ayudan a reducir el problema como: mantener la vegetación de las zonas de ribera o bandas de amortiguamiento, crear lagunas de retención, adoptar labranzas conservacionistas, terrazas y cultivos de cobertura. Estudios recientes reportan que forrajes anuales de estación fría pueden secuestrar de 7 a 42 kg de P ha^{-1} y de 8 a 290 kg N ha^{-1} en época de crecimiento dependiendo de las precipitaciones y la preparación del terreno (Muir, 2009). El pasto Bermuda Tifton 85, que es de mayor valor nutritivo para las vacas y crece al final de la estación fría, extrae un promedio de 36 kg de P ha^{-1} año $^{-1}$ (0.25 % de P en forraje) (Muir, 2009). Igualmente, las zonas de amortiguamiento de la ribera reducen entre un 50- 85% el transporte de P a los cursos de agua. Ciertamente, estas soluciones deben ser combinadas con reducciones de fuentes de nutrientes al suelo para evitar la continua acumulación de nutrientes en el suelo (Carpenter et al., 1998). Sin embargo, en las regiones tropicales como Puerto Rico, donde la lluvia es abundante durante todo el año, el uso de cultivos de cobertura para remediar suelos sobre fertilizados con P es mínimo y son una buena alternativa por los demás beneficios que prestan al medio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de niveles de aplicación de estiércol bovino sobre plantas de cobertura rábano (*Raphanus sativus* L.) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack), y propiedades químicas del suelo.

Objetivos Específicos

1) Determinar la concentración de P y N de las plantas de cobertura rábano y triticale bajo cuatro niveles de estiércol bovino en condiciones de umbráculo.

2) Evaluar la concentración y absorción de P y N en raíces y vástago del cultivo de rábano en condiciones de campo en dos tipos de suelo un Oxisol y un Ultisol, utilizando cuatro niveles de estiércol bovino.

3) Determinar el efecto del uso de estiércol bovino y la incorporación de la planta de cobertura rábano sobre las concentraciones de macronutrientes, pH y MO en dos tipos de suelo Oxisol y Ultisol.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.1 Uso de plantas de cobertura para mejorar el suelo

Los cultivos de cobertura han sido ampliamente utilizados para mejorar el suelo y el rendimiento de los cultivos siguientes, ya que ayudan a controlar la erosión, aumentan la materia orgánica (MO) gracias a la descomposición de sus residuos y evitan que se pierdan los nutrientes por lixiviación. Además, algunas coberturas suprimen las malezas, aumentan disponibilidad de agua en el suelo y reducen la compactación del suelo (Clark, 2007). Las plantas comúnmente utilizadas como cobertura son leguminosas, gramíneas y/o plantas de la familia Brassicaceae. Plantas de la familia Brassicaceae como *Raphanus sativus*, *Brassica juncea*, *Sinapis alba*, *Brassica rapa*, *Brassica nigra* y *Brassica napus* son comúnmente utilizadas como cultivos de cobertura debido a su rápido crecimiento, gran producción de biomasa, capacidad de secuestrar nutrientes, control de nematodos, malezas y enfermedades mediante liberación de compuestos químicos (Clark, 2007). Algunas plantas de la familia brassicaceae pueden contener en sus tejidos glucosinolatos los cuales son convertidos a isotiocianatos cuando la planta sufre de daño mecánico, estos compuestos tienen propiedades antifúngicas por lo cual no son hospederos de micorrizas arbusculares, sembrar *Raphanus sativus* L. var. Longipinnatus como cobertura no resulta ser toxico para la colonización de micorrizas de cultivos posteriores como el maíz, debido a la rápida descomposición y/o volatilización de los compuestos o la falta de contacto de los isotiocianatos con las hifas de las micorrizas en suelos no arados (White y Weil, 2009).

Los cultivos de cobertura tienen la capacidad de reducir la cantidad de NO_3-N que puede lixiviarse debido a una rápida absorción, también protegen al suelo de la erosión reduciendo la tasa de escorrentía y la pérdida de P (Miller et al., 1994). Brassicas como rábano forrajero y canola (*Brassica napus* L. cv. Dwarf Essex) pueden producir 41% más de materia seca y capturar 46% más nitrógeno que el centeno (*Secale cereale* L. cv. Wheeler) en otoño (Deal y Weil, 2009).

Se ha observado disminución de pH de 6.5 a 4.1 en la rizósfera de plantas de *Brassica napus*, var. Emerald aumentando hasta 10 veces el P en la solución del suelo, este P es el que estaría disponible para absorción por las plantas aumentando su concentración en el tejido (Grinsted et al., 1982). La disminución de pH puede deberse a una mayor absorción de cationes que de aniones la cual está acompañada por la liberación de H^+ para mantener un balance de cargas en la interfase raíz-suelo (Hendley et al., 1982)

En condiciones de alta disponibilidad de P *Raphanus sativa*, cv. Colonel concentra de 12 a 43% más P que la mostaza *Sinapis alba*, cv. IdaGold por lo que sería ideal para usar en suelos donde se desea extraer alto contenido de P. Sin embargo, ambas especies acumulan grandes cantidades de N en su follaje (Brown et al., 2008).

3.1.2 Rábano (*Raphanus sativus* L.)

El rábano *Raphanus sativus* L. Es comúnmente conocido como rábano forrajero (RF), rábano japonés y Daikon. Este se ha utilizado ampliamente como cobertura además de su alta producción de biomasa y aceite de las semillas (Magdoff y Van, 2009). El uso de RF como cobertura se debe a que permite una captación significativa de nutrientes ya que desarrolla una raíz principal de 2.5 a 5 cm de diámetro y 30 cm de profundidad la cual puede romper capas compactadas del suelo permitiendo un enraizamiento más profundo donde el cultivo principal no puede llegar, y así evita la pérdida de N por lixiviación (Magdoff y Van, 2009). Al descomponerse la raíz deja poros en el suelo que permiten la entrada de agua y aire y el desarrollo de cultivos primarios cuando el suelo está seco, por lo tanto, el RF puede ser usado como alternativa de no labranza o labranza biológica (Weil et al., 2009). Después de tres años de uso de RF los análisis de suelo cerca de los poros dejados por la raíz muestran mayor cantidad de P que los sitios alejados de estos, mejorando la retención de nutrientes cerca de la superficie del suelo. Además, la alta concentración de P en sus tejidos sugiere un alto potencial para ser utilizado remediando suelos con altos contenidos de P. Al cosechar el (RF) para uso como forraje se remueve también el exceso de P en el suelo, ya que extrae aquellos

nutrientes que no fueron aprovechados por los cultivos principales, reduciendo de esta manera perdida de nutrientes por escorrentía (White y Wheil, 2011).

El vástago de RF puede tener mayor concentración de P que el centeno, sin embargo, la absorción de P puede ser igual cuando produce gran cantidad de materia seca, ya que absorción de P en plantas de cobertura puede estar influenciada por el rendimiento de materia seca (RMS) o la concentración del nutriente en el tejido (White y Wheil, 2011). El RF acumula en promedio de 144 kg N ha^{-1} más que otras especies de Brassicas como la mostaza y los nabos las cuales acumulan 98 y 99 kg N ha^{-1} respectivamente. Sin embargo, estas especies no se descomponen tan rápidamente como RF por lo cual pueden retener el N por más tiempo. Entonces el RF no garantiza que se eviten las pérdidas de N al ambiente ni que esté disponible para los cultivos siguientes (Gieske et al., 2016). Además, esta rápida descomposición de los tejidos proporciona más carbono y nitrógeno lábil lo cual estimula la liberación de óxido nitroso (N_2O) un gas de efecto invernadero (Thomas et al., 2017). El RF puede ser utilizado también para la supresión de malezas debido a su rápido crecimiento y cobertura impidiendo el paso de la luz para el desarrollo de malas hierbas, reduciendo las necesidades de herbicidas sintéticos. Sin embargo, la supresión de malezas puede no persistir hasta la etapa del crecimiento del cultivo posterior (Lawley et al., 2011). El rábano puede ser usado en sistemas de no arado ya que sus raíces aumentan como resistencia a la compactación del suelo, en comparación con plantas como el centeno y la colza debido a un mayor diámetro de raíz logrando mayor densidad de raíces que otras de menor diámetro (Chen y Weil, 2009).

3.1.3 Triticale (X. *Triticosecale* Wittmack)

El triticale (TR) es un cereal híbrido que procede del cruzamiento entre trigo y centeno, combinando la capacidad de adaptación del centeno ante condiciones de estrés altas (e.g heladas, suelos ácidos, arenosos y poco profundos) con el valor nutricional del trigo. El triticale presenta mayor contenido de lisina el cual es un aminoácido limitante en otros cereales y una mejor digestibilidad proteínica, además tiene mayor contenido de P que sus progenitores (4.5 g kg^{-1} de materia seca versus 3.8 y 4.1 g kg^{-1} en el trigo y el centeno, respectivamente) (Varughese et al., 1987). Actualmente, es un complemento ideal en la

alimentación de cerdos y gallinas cuyas necesidades de P son considerables (Varughese et al., 1987). Mundialmente es utilizado como forraje y grano debido a que mantiene buen rendimiento ante condiciones de sequía y suelos ácidos. Igualmente, está adaptado a suelos con alta fertilidad y alto contenido de P y potasio (K), por lo cual es ideal para reducir la pérdida de nutrientes. Este cultivo es una buena opción para rotación en sitios de ganadería intensiva (Chapman et al., 2005). Se conocen tres tipos diferentes de triticale: 1) primavera, 2) invierno y 3) facultativos. El de primavera es más tolerante a la sequía, el de invierno necesita un periodo de vernalización. El de invierno es comúnmente utilizado como planta de cobertura durante el otoño y el de primavera como protector de suelos altamente erosionables a la vez que capta nutrientes que de otra manera se perderían al ambiente (Kilcer et al., 2010). Es un forraje de alta calidad con un rendimiento de 5-10 ton ha^{-1} de MS (Kilcer et al., 2010), y eficiente removiendo P del suelo el cual puede variar de 8 a 34 kg ha^{-1} en suelos que no han sido fertilizados con estiércol (Brown y Griggs, 2009).

3.1.4 Fertilización Orgánica

La dependencia desmedida de los fertilizantes inorgánicos para maximizar el rendimiento de las cosechas ha llevado a creer que son los causantes de los efectos negativos en suelos agrícolas a largo plazo como la contaminación del agua e incremento de plagas. Por lo tanto, en muchas ocasiones se ha preferido el uso de abonos orgánicos provenientes de estiércol de diferentes especies de animales de granja, sin embargo, esto también puede causar contaminación de las fuentes de agua debido a un exceso de aplicación de nutrientes. La MO contenida en estos abonos orgánicos debe ser descompuesta por microorganismos presentes en el suelo para que finalmente se puedan incorporar estos nutrientes a las plantas (Longoria, 2000). Uno de los beneficios que aporta la MO al suelo es que puede hacer más aprovechable el P en suelos ácidos, ya que los ácidos liberados se combinan con los óxidos de hierro y aluminio dejando disponible el P para las plantas, además mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo y su actividad biológica. En un estudio realizado en Alberta Canadá en 1993-2001 (Olson et al., 2003) encontraron que la aplicación de estiércol durante ocho años incrementó los niveles de P y N total del suelo, al igual que el sodio (Na), K y magnesio (Mg). Ciertamente, la MO proveniente de la aplicación de estiércoles es una excelente fuente

de nutrientes para producción de cultivos agrícolas incrementando el rendimiento de los cultivos. Al contrario de los fertilizantes inorgánicos, la MO tiene un mayor efecto residual que le permite liberar de forma gradual los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, el estiércol reduce la erosión dando estabilidad al suelo (Miller et al., 1994)

Las dosis de aplicación de estiércol son recomendadas según las necesidades de N, por ejemplo, si se quiere aplicar 50, 100 y 150 kg N ha^{-1} se deben aplicar 10.4, 20.8 y 31.2 Mg ha^{-1} (Mega gramos por hectárea) de estiércol en el primer año. Estas dosis son recomendadas considerando que el estiércol este en base seca (30% de humedad) y con 1.5% de N. Después del quinto año se pueden aplicar dosis constantes de 6.4, 12.9 y 19.3 Mg ha^{-1} de estiércol. Es importante considerar el tiempo de aplicación de estiércol antes de la siembra, debido a los procesos de mineralización influye en la producción de un cultivo. Por ejemplo, en maíz blanco Hualahuises el diámetro del tallo y rendimiento de materia seca se ven aumentados cuando se siembra de 7 a 15 días después de la aplicación de estiércol, y no fueron afectados por las dosis usadas (Longoria, 2000).

3.1.5 Descomposición de materia Orgánica

La MO comprende diferentes compuestos de carbono proveniente de residuos de origen vegetal y animal en varias etapas de descomposición, además sustancias sintetizadas microbiológica y/o químicamente y un conjunto de microorganismos vivos y muertos. Estos compuestos desempeñan una variedad de papeles en los nutrientes del suelo, el agua y los ciclos biológicos, mejora la estructura y aireación del suelo, la capacidad de retención e infiltración de agua, la capacidad de intercambio catiónico, estabiliza el pH del suelo y quelatación de micronutrientes y oligoelementos (Manitoba, 2013; Meléndez y Soto 2003). Los residuos comienzan un proceso de transformación por parte de micro y macro organismos que los utilizan como fuente de energía liberando CO_2 y nutrientes contenidos en la MO a través de la mineralización a formas inorgánicas los cuales pueden ser absorbidos por las plantas (Manitoba, 2013).

4 Experimento I. Evaluación de la concentración de P y N en rábano (*Raphanus sativus* L) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack) con aplicación de estiércol bovino bajo condiciones de umbráculo

4.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos

El primer experimento se realizó en el umbráculo ubicado en las instalaciones del Departamento de Ciencias Agroambientales (Edif. Piñero). Se utilizó como sustrato base un suelo Oxisol serie Coto proveniente de la estación experimental agrícola (EEA) de Isabela y estiércol bovino (compostada) proveniente de la Vaquería Lopéz ubicada en el municipio de Arecibo. Para el primer estudio la siembra se realizó el 26 de septiembre y se cosechó el 23 de noviembre de 2015, para el segundo estudio se sembró el 12 de noviembre de 2015 y se cosechó el 20 de enero de 2016.

4.1.3 Concentración de P y N en rábano y triticale

El primer estudio evaluó la concentración de P y N en RF y TR considerando un tratamiento control (no estiércol) y una dosis de aplicación de estiércol (60 Mg ha^{-1}). Ambos cultivos crecieron en tiestos de tres litros (20 cm de altura y 19 cm de diámetro) y sobre el sustrato base utilizando una densidad de siembra de 13 y 125 kg ha^{-1} según recomienda (Björkman y Shail, 2010) para RF y para TR (Mendoza et al., 2011), respectivamente. Estas densidades fueron extrapoladas según el área del tiesto (0.152 m^2) 0.2 g y 1.9 g de semilla para RF y TR respectivamente. Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con arreglo factorial 2 x 2, con cuatro repeticiones. Cada tratamiento tenía tres submuestras, un tiesto de tres litros por muestra.

En el segundo estudio se evaluó la concentración de P y N en RF y TR bajo tres dosis de aplicación de estiércol (5, 15 y 40 Mg ha^{-1}) y un tratamiento control (0 Mg ha^{-1}). Ambos cultivos crecieron en tiestos de 1.5 litros (altura de 11.5 cm y diámetro de 14 cm) y sobre el

substrato base utilizado en el estudio uno. la densidad de siembra fue de 13 y 125 kg ha^{-1} según recomienda (Björkman y Shail, 2010) para RF y para TR (Mendoza et al., 2011), respectivamente. Estas densidades fueron extrapoladas según el área del tiesto (0.0154 m^2) 0.02 g y 0.19 g de semilla para RF y TR respectivamente. Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con arreglo factorial 4 x 2 con cuatro repeticiones por tratamiento.

La biomasa producida fue cosechada a los dos meses después de la siembra, y el tejido fue secado en un horno a 60º C por 72 horas. Se determinó el peso seco y luego la muestra se molió utilizando un molino tipo Wiley (pasando por un cedazo de 1-mm). El porcentaje de P se extrajo por mineralización seca y se cuantificó con espectroscopia de plasma acoplado inductivamente con el instrumento: Perkin Elmer Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin y Elmer, 1994). El porcentaje de N se determinó utilizando el método de Kjeldahl (Foss, 2002) el cual es basado en N total. Ambos análisis se realizaron en la Estación de Investigación de Agricultura Tropical (TARS).

4.1.4 Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se determinaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando (PROC GLIMMIX) con el paquete estadístico “Statistical Analysis System” (SAS versión 9.4; SAS 2009). Tratamiento con efectos significativos ($P < 0.05$), se compararon utilizando la prueba LSD de Fisher. Análisis de regresión se realizaron utilizando los niveles de estiércol como variable independiente y la concentración de P y N en el tejido como variable dependiente para ver los efectos de las dosis de aplicación de estiércol.

4.1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.6 Experimento I

4.1.7 Concentración de nutrientes en rábano y triticale con una dosis de aplicación de estiércol 60 Mg ha^{-1}.

Rábano con aplicación de estiércol muestra un contenido de N de 4.02% y no es diferente ($p > 0.05$) al tratamiento sin aplicación (3.58%). Triticale muestra un porcentaje de N de 2.43 sin aplicación de estiércol y su contenido es mayor con la aplicación (3.71%). Las especies no muestran diferencia significativa en la concentración de N cuando se aplica estiércol. Sin embargo, sin aplicación rábano tiene mayor contenido de N (3.59%) que TR (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de aplicación de estiércol bovino en el contenido de nitrógeno y fósforo en rábano (*Raphanus sativus* L.) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack)

	Rábano		**Triticale**				
	Aplicación de estiércol				P-valor		
Variables	Con[1]	Sin[2]	Con	Sin	Efecto Especie	Efecto Dosis	E x D [3]
% N[$]	4.02a[*]	3.59a	3.71a	2.43b	0.0025	0.0010	0.029
% P	0.49b	0.26c	0.67a	0.17d	NS[^]	<0.001	0.002

[1] Refiere a la aplicación de 60 Mg ha^{-1} de estiércol
[2] Refiere a la no aplicación de estiércol
[3] E x D refiere al efecto de interacción de especie x dosis
*Letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. [^]NS: no significativo (P-valor >0.05)
[$] N-nitrógeno, P-fósforo.

Para una aplicación de 60 Mg ha^{-1} de estiércol, el porcentaje de P es significativamente diferente entre ambas especies con y sin aplicación de estiércol. El RF y triticale (TR) presentan mayor contenido de P en sus tejidos cuando se aplica estiércol. Sin la aplicación de estiércol RF presenta mayor cantidad de P (0.26%) que TR (0.17%), pero con la aplicación TR es la especie con mayor contenido (0.67%) ($P < 0.05$).

4.1.8 Concentración de nutrientes en rábano y triticale con cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 5, 15 y 40 Mg ha^{-1}.

En el segundo experimento, la interacción dosis x especie no fue significativa para el contenido de N, pero si hubo un efecto de especie, donde RF presentó un contenido de N de 3.70% mayor al encontrado en TR 2.75%. Las dosis de estiércol aplicadas no tuvieron efecto en la concentración de N ni de P en ninguna de las dos especies (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de aplicación de cuatro niveles de estiércol bovino en el contenido de nitrógeno y fósforo en rábano (*Raphanus sativus* L.) y triticale (x*Triticosecale* Wittmack)

Dosis Mg ha^{-1}	**N$^{\$}$**		**P**	
	Rábano	Triticale	Rábano	Triticale
0	3.73	2.50	0.61 a*	0.26 c
5	3.52	2.66	0.65 a	0.33 cb
15	3.85	2.79	0.68 a	0.44 ba
40	3.69	3.03	0.53 a	0.49 a
Promedio x Especie	3.70A$^{\&}$	2.75B	0.62A	0.38B
	P-valor			
Efecto Especie	<.0001		<.0001	
Efecto Dosis	NS$^{\wedge}$		NS	
Interacción	NS		0.079	

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. $^{\wedge}$NS: no significativo (P-valor >0.05).
$^{\&}$ letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.
$^{\$}$ N-nitrógeno, P-fósforo.

Para P, considerando una probabilidad de P < 0.1 la interacción de dosis x especie fue significativa (Tabla 2); para RF no se encontraron diferencias entre dosis, sin embargo, para TR la dosis de 15 Mg ha^{-1} muestra un contenido de P (0.44%) en el tejido la cual es significativamente mayor al de la dosis de cero (0.26%), pero no es diferente al encontrada con 40 Mg ha^{-1} (0.49%). En promedio RF tiene un contenido de P de 0.62% y es mayor al encontrado en TR (0.38%). El análisis de regresión fue significativo (P<0.05) solo para TR, mostrando una relación cuadrática entre dosis de aplicación de estiércol y concentración de P en el tejido (Figura 1).

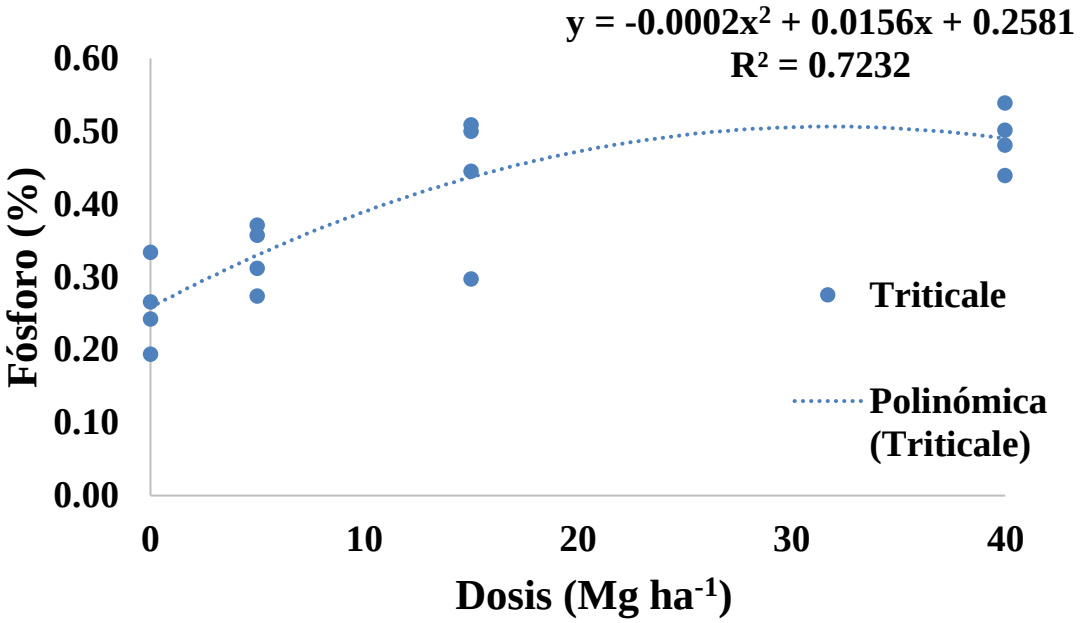

Figura 1. Relación tipo cuadrática entre la concentración de fósforo en los tejidos de triticale y cuatro dosis de aplicación de estiércol.

En ambos experimentos RF muestra una mayor concentración de N en sus tejidos, independientemente de la aplicación de estiércol en la superficie de suelo, su concentración se encuentró dentro de los valores considerados normales (3 a 5%) según definidos por Mills y Benton (1996) y Weil y Kremen (2007). Si existe una respuesta a la aplicación de estiércol al aumentar la concentración de P en sus tejidos cuando se usa una dosis de estiércol 60 Mg ha^{-1}, mostrando valores que se encuentran como normales dentro del rango reportado de 0.25 a 0.50 % (Mills y Benton, 1996). Sin embargo, con aplicaciones más bajas de estiércol (0-40 Mg ha^{-1}) no hubo una respuesta en la concentración de P en el tejido de RF. Aunque RF no aumente la concentración de N en sus tejidos a causa de una aplicación de estiércol siempre presenta mayor concentración de N que triticale, por lo cual este elemento estaría disponible para el cultivo principal después de su rápida descomposición mejorando así la fertilidad del suelo (Weil et al., 2009).

Por otro lado, TR presenta en ambos experimentos respuesta a aplicación de estiércol al aumentar la concentración de P en sus tejidos, pero, cuando el estiércol es incorporado en dosis más bajas (0-40 Mg ha^{-1}) no hay repuesta a N y su concentración de P es más baja que

en RF, al parecer hay mejor respuesta por parte de esta especie cuando el estiércol es aplicado en dosis más altas (60 Mg ha^{-1}).

4.1.9 CONCLUSIONES

En condiciones de invernadero las dos especies presentan respuesta a la aplicación de estiércol, aumentando la concentración de nutrientes en sus tejidos cuando se aplican concentraciones altas como 60 Mg ha^{-1}. Triticale tiene mayor contenido de P en sus tejidos que RF con dosis altas 60 Mg ha^{-1}. Sin embargo, con dosis más bajas existe una relación cuadrática para P y las dosis usadas de estiércol en TR. Rábano presenta más concentración de N y P cuando se usan dosis más bajas de estiércol, pero no hay una respuesta a las dosis aplicadas de estiércol. Condiciones de umbráculo pueden no ser muy reales para evaluar el comportamiento de plantas de cobertura ante las dosis de estiércol aplicadas.

5 Experimento II. Evaluación de rábano (*Raphanus sativus* L) en un Oxisol en condiciones de campo bajo cuatro niveles de aplicación de estiércol bovino

5.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos

La evaluación de rábano en campo fue realizada en la zona noroeste de la isla (18° 30' Latitud norte y 67° 00' Longitud oeste) a 128 msnm dentro de los predios de la Estación Experimental Agrícola (EEA) de Isabela, Puerto Rico. La precipitación promedio anual es de 1451 mm, con una temperatura media anual de aproximadamente 25.2°C y fluctuaciones al año entre 19 y 29°C (climate-data.org, 2017). Los suelos son de tipo Oxisol de la serie Coto (Muy fino, caolínitico, isohipertérmico, típico Eutrustox) (Beinroth et al., 2003). La siembra de RF fue hecha el 30 de enero de 2016 y la cosecha fue realizada el 31 de marzo de 2016.

5.1.3 Preparación del terreno y diseño experimental

Se utilizó un área aproximada de 256 m^2 (16m x 16m). Se realizó labranza convencional con pase de arado y rastra a una profundidad aproximada de 30 cm.

Se realizó un DBCA con cuatro repeticiones y un arreglo de parcelas divididas. La parcela principal fue el factor RF (presente y ausente) y las sub-parcelas fueron los cuatro niveles de estiércol (0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1}). El RF fue sembrado a una densidad de 13 kg ha^{-1}. La sub-parcela tuvo un área de 4 m^2 (2 x 2). La biomasa producida fue cosechada a los dos meses después de la siembra en un área de (0.25m^2) para análisis foliar, y el restante fue incorporado para tomar muestras de suelo después de cinco semanas.

5.1.4 Procesamiento de las muestras de rábano

La biomasa cosechada fue dividida en vástago y raíz para análisis de nutrientes por separado. Esta biomasa fue secada en un horno a 60° C por 72 horas, se determinó peso seco y luego se molió utilizando un molino tipo Wiley (pasar un cedazo de 1-mm). El contenido de P se extrajo por mineralización seca y se cuantificó con espectroscopia de plasma acoplado inductivamente con el instrumento: Perkin Elmer Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin y Elmer, 1994). El porcentaje de N se determinó utilizando el método de Kjeldahl (Foss, 2002) el cual es basado en N total. Ambos análisis se realizaron en la Estación de Investigación de Agricultura Tropical (TARS).

5.1.5 Análisis de suelo

Se tomó una muestra compuesta de suelo por parcela al azar en forma de zigzag en una profundidad de 15 cm. Se realizaron dos muestreos: 1) en parcelas en donde se había incorporado el RF después de cinco semanas de cosechado (SuEstRF) y 2) en parcelas donde solo se había aplicado estiércol en el mismo tiempo de muestreo que las demás parcelas (SuSolEst).

Las muestras de suelo fueron secadas y molidas para determinar las concentraciones de N, P, K, Mg, Ca, pH y MO. El N en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) se determinaron por destilación al vapor siguiendo la metodología de Benton (2001) y Sparks (2007). Los demás nutrientes se determinaron por el Mehlich III según Benton (2001) el cual ha sido utilizado en estudios de fertilidad para un amplio rango de tipos de suelos y tiene capacidad para determinar varios nutrientes. El pH fue determinado con Cloruro de Calcio y el porcentaje de MO se determinó por el método Walkley Black de Benton (2001) y Sparks (2007). Todos los análisis se realizaron TARS.

5.1.6 Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se determinaron mediante un ANOVA utilizando un modelo mixto (PROC GLIMMIX) con el paquete estadístico SAS versión 9.4; (SAS 2009). Tratamiento con efectos significativos ($P < 0.05$), se compararon utilizando la prueba LSD de Fisher. Análisis de regresión se realizaron utilizando los niveles de estiércol como variable independiente y la concentración de P y N en el tejido y suelo como variable dependiente para ver los efectos de las dosis de aplicación de estiércol. Análisis de contrastes fueron realizados para comparar el efecto de las dosis de aplicación de estiércol sobre la absorción y concentración de nutrientes en el tejido y raíz de rábano.

.

5.1.7 Resultados y discusión

5.1.8 Experimento II

5.1.9 Análisis de tejido de rábano en un suelo Oxisol bajo cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1}

El rendimiento, la concentración y absorción de N y P en RF fue diferente entre el vástago y la raíz ($P< 0.05$) (Tabla 3). Una mayor producción de biomasa se evidencia en el vástago con un rendimiento de 5,345 kg ha^{-1} y de 978 kg ha^{-1} en la raíz. La concentración de P en el vástago fue de 2.05 g kg^{-1} y 0.86 g kg^{-1} para la raíz. Para N la concentración fue de 24.4 g kg^{-1} y 21.7 g kg^{-1} para vástago y raíz, respectivamente. La absorción de nutrientes para vástago fue de 10.2 kg P ha^{-1} y 129 kg N ha^{-1} y para la raíz fue 0.86 Kg P ha^{-1} y 21.4 kg N ha^{-1} (Tabla 3).

La cantidad de N absorbido en el tejido de RF de 129 kg N ha^{-1} demuestra la capacidad de esta planta para reducir las pérdidas de NO_3-N por lixiviación. Debido a su sistema radicular el RF tiene la capacidad de absorber N a mayor profundidad dejándolo disponible para el cultivo principal cuando se descompongan sus residuos (Deal y Weil, 2009), esta absorción de N puede ser mayor en suelos con aplicación de estiércol debido a la mineralización del N (Weil et al., 2009). Sin embargo, en este estudio no se evidencio un

efecto de aplicación de estiércol sobre la absorción de N, probablemente debido al poco tiempo de exposición del estiércol en el suelo.

Un efecto de las dosis de aplicación de estiércol se presenta solo para la concentración y absorción de P. Con la dosis de 40 Mg ha^{-1} hubo mayor concentración 1.88 g P kg^{-1} que con la dosis de 0 Mg ha^{-1} (0.97 g P kg^{-1}) y mayor absorción con la dosis de 40 Mg ha^{-1} (5.96 kg P ha^{-}1) que con la dosis de 0 Mg ha^{-1} (3.25 kg P ha^{-1}) (Tabla 4).

El análisis de tejido solo muestra interacción para la absorción de P en donde con la dosis de 0 Mg ha^{-1} en el vástago hay una absorción de 5.93 kg P ha^{-1} y es significativamente menor a la absorción encontrada con las dosis de 10, 20 y 40 Mg ha^{-1} con medias de 13.6, 9.95 y 11.3 kg P ha^{-1} respectivamente (Tabla 4). La absorción de P en la raíz fue menor que la encontrada en el vástago a 0 Mg ha^{-1} y no se encontraron diferencias entre las dosis.

Tabla 4. Efecto de la interacción dosis de estiércol x partes para la absorción de fósforo en el tejido del rábano (*Raphanus sativus* L.)

Partes	**Dosis de estiércol**			
	Mg ha^{-1}			
	0	10	20	40
Vástago	5.93c*	13.6a	9.95b	11.3ab
Raíz	0.58 d	1.10d	1.10d	0.67d

*Letras diferentes indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.

Análisis de Contrastes

Los análisis de contrastes demostraron que las dosis de aplicación de estiércol tienen un efecto sobre la concentración y absorción de P (Tabla 5). En el contraste sin estiércol versus con estiércol hubo diferencias significativas y también el contraste sin estiércol versus dosis de 40 Mg ha^{-1}. Todas las variables evaluadas mostraron diferencias significativas para el contraste vástago y raíces donde el rendimiento, concentración y absorción de P y N fue mayor para vástago que en la raíz.

Tabla 3. Efecto de dosis de aplicación de estiércol sobre rendimiento, concentración y absorción de fósforo y nitrógeno en el vástago y raíces de rábano (*Raphanus sativus* L.)

	Rendimiento		**P**				**N**			
Dosis (Mg ha^{-1})	(kg ha^{-1})		Concentración (g kg^{-1})		Absorción (kg ha^{-1})		Concentración (g kg^{-1})		Absorción (kg ha^{-1})	
0	2,758		0.97 c*		3.25 b		23.4		69.1	
10	3,656		1.74 ba		7.36 a		24.2		84.8	
20	3,461		1.26 bc		5.53 ab		20.1		71.1	
40	2,770		1.88 a		5.96 a		24.5		75.7	
Prom.x Parte	Vástago	Raíz	Vástago	Raíz	Vástago	Raíz	Vástago	Raíz	Vástago	Raíz
	5,345A&	978B	2.05A	0.87B	10.2A	0.86B	24.4A	21.7B	129A	21.4B
Efectos										
Dosis	NS^		0.013		0.02		NS		NS	
Partes	<.0001		<.0001		<.0001		0.021		<.0001	

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. ^NS: no significativo (P-valor >0.05).

& letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.

$ N-nitrógeno, P-fósforo.

Tabla 4. Efecto de contrastes para la concentración y absorción de fósforo y nitrógeno con cuatro dosis de aplicación de estiércol.

Contrastes	P valor [&](RMS)	P valor (P) concentración	P valor (P) Absorción	P valor (N) concentración	P valor (N) Absorción
Sin estiércol vs con estiércol	>0.05	0.0088	0.0064	>0.05	>0.05
Sin estiércol vs Dosis de 40	>0.05	0.0037	0.0381	>0.05	>0.05
Vástago vs Raíz	<0.001	<.0001	<.0001	0.0210	<0.001

P valor > a 0.05 indican no diferencia significativa con la prueba LSD de Fisher.

[&]RMS-rendimiento de materia seca, P- fósforo, N-nitrógeno.

La producción promedio de materia seca para la raíz en este estudio fue 978 kg ha^{-1} muy similar a lo reportado por (White y Weil, 2011) para *Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* 1000 kg ha^{-1}. La absorción de P por parte de RF puede estar más relacionada con la cantidad de materia seca cosechada que con la concentración del nutriente en el tejido. Un RMS de hasta 4,282 kg ha^{-1} con una concentración de 4.1 g P ha^{-1} en él vástago pueden tener una absorción de 18 Kg de P ha^{-1} (White y Weil, 2011). Sin embargo, para este estudio la producción promedio de materia seca fue de 5,345 kg ha^{-1} con una concentración promedio de 2.05 g P ha^{-1}. La absorción fue de 10.2 kg de P ha^{-1} por lo cual en este caso la absorción estuvo más relacionada con la concentración de P en el tejido (R^2 =0.72) que con el RMS (R^2= 0.58), a pesar de tener un mayor rendimiento de materia seca hay menor concentración de P en el tejido y por lo tanto menor absorción.

Mayor concentración y absorción de P se presentan como respuesta a la aplicación de dosis de estiércol debido a un aumento del P aplicado. Respuestas similares se reportan para el *Raphanus sativa*, cv. Colonel donde se encontró mayor concentración de P a medida que se aumenta el P disponible en el suelo (Brown et al., 2008). Este comportamiento evidencia la capacidad de rábano como planta remediadora de suelos con alto contenido de P debido a

la sobrefertilización con estiércol, además cultivos de cobertura de la familia Brassicaceae pueden remover en el vástago hasta 40 kg P ha^{-1} en solo tres meses (Weil y Kremen 2007).

Análisis de regresión fue significativo solo para concentración de P en vástago y raíces (Figura 2). Se observó una relación lineal para ambas partes de la planta, a medida que se aumentan las dosis de aplicación de estiércol también se aumenta la concentración de P en la planta.

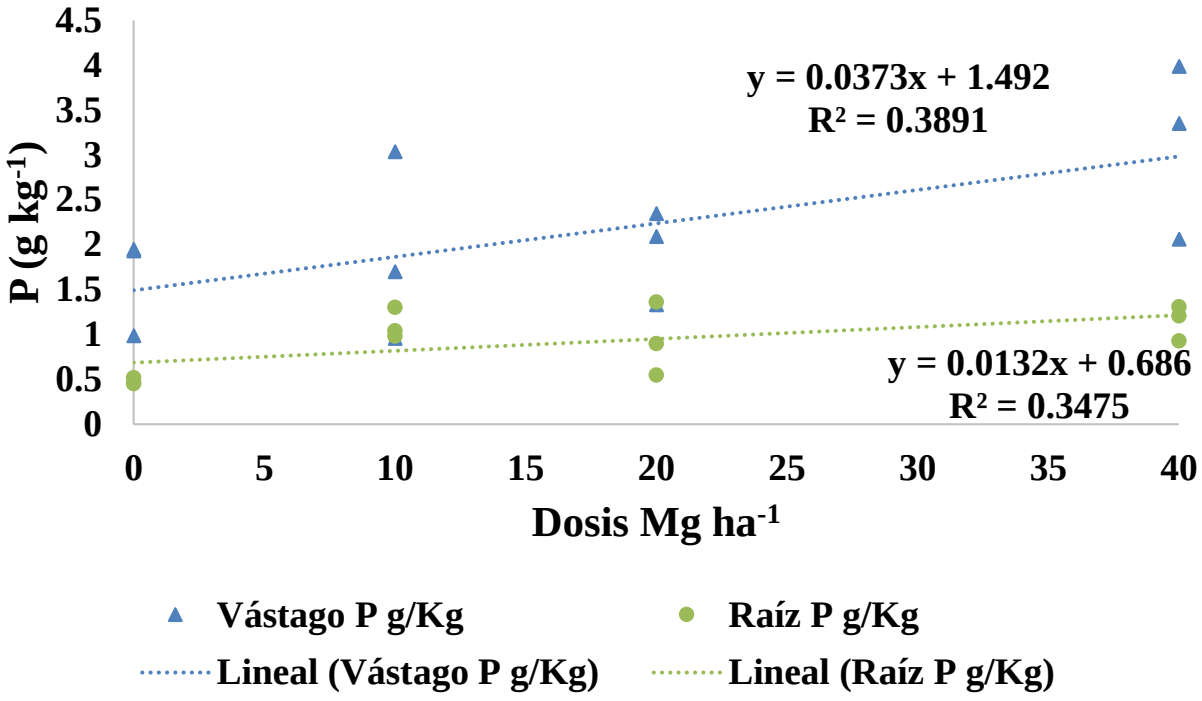

Figura 2. Regresión para concentración de fósforo en el tejido de rábano *Raphanus sativus* L, para raíz y vástago.

5.1.9.1 Análisis de suelo con aplicación de estiércol más la incorporación de la planta de cobertura y suelo con estiércol sin la incorporación de planta de cobertura

Hubo interacción significativa para N- NH_4^+, K, Mg y pH, para K hubo mayor concentración para el tratamiento (SuSolEst) con la dosis de 40 Mg ha^{-1} 295.31 mg kg^{-1} de K por el contrario para el tratamiento (SuEstRF) no hubo diferencias significativas entre dosis, aunque si fueron diferentes a la dosis de 40 Mg ha^{-1} encontrada con el tratamiento (SuSolEst).

Mayor concentración de Mg se encuentra en el tratamiento (SuSolEst) con la dosis de 40 Mg ha^{-1} 185.48 mg Mg por kg^{-1} y es significativamente diferente a la dosis de 0 Mg ha^{-1} para este mismo tratamiento 52.15 mg Mg por kg^{-1} por el contrario para el tratamiento (SuEstRF) no hubo diferencias significativas entre dosis, pero si fueron diferentes a las dosis de 40 y 0 Mg ha^{-1} con el tratamiento (SuSolEst). El pH más alto 4.91 fue encontrado en el tratamiento (SuSolEst) con la dosis de 40 Mg ha^{-1} significativamente diferente con las dosis de 0 y 10 Mg ha^{-1} 3.8 y 3.95 respectivamente para el mismo tratamiento, el pH encontrado con el tratamiento (SuEstRF) encontrado fue de 4.44 con la dosis de 40 y no es diferente de las dosis de 20 y 10 Mg ha^{-1} para el mismo tratamiento, pero si difiere de la dosis de 40 Mg ha^{-1} del tratamiento (SuSolEst) (Tabla 6).

Tabla 5. Efecto de la interacción de dosis x tratamiento ((SuSolEst) y (SuEstRF)). En la concentración de nutrientes y pH en el suelo.

Dosis Mg ha^{-1}	**pH**$^{\$}$		**K**		**Mg**		**NH_4^+**	
			mg kg^{-1}					
	S.E.^	R.E.	S.E.	R.E.	S.E.	R.E.	S.E.	R.E.
0	3.80 c*	4.20 bc	101 c	145 bc	52.2 c	61.3 b	20.0 abc	33.2 a
10	3.95 c	4.39 b	139 bc	149 bc	72.3 b	76.5 b	8.31 c	20.0 abc
20	4.46 b	4.41 b	185 b	144 bc	97.5 b	78.7 b	16.6 abc	11.6 bc
40	4.91 a	4.44 b	295 a	153 bc	186 a	82.1 b	26.6 ab	20.0 abc

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.
^ S.E- suelo con solo estiércol (SuSolEst) y RE suelo con estiércol y rábano (SuEstRF).
$^{\$}$ pH, K-potasio, Mg- magnesio, NH_4-amonio.

Solo existe efecto del tratamiento sobre la concentración de N-NO_3 en el suelo. Mayor concentración de este elemento se encuentra cuando hay una incorporación de la planta de cobertura 36.2 mg N-NO_3^- kg^{-1} SuEstRF (suelo con estiércol más rábano incorporado) y es significativamente diferente cuando no hay una incorporación de la planta de cobertura SuSolEst (suelo con sólo estiércol) 12.4 mg N-NO_3^- kg^{-1}. Para P, Ca y porcentaje de MO hubo efecto de dosis. Una aplicación de estiércol de 40 Mg ha^{-1} mostró una concentración en el suelo de 65.3 mg P kg^{-1}, 456 mg Ca kg^{-1} y 2.45 % de MO estas concentraciones fueron significativamente diferentes cuando no se aplicó estiércol 21.2 mg P kg^{-1}, 278.1 mg Ca kg^{-1} y 2.01 % MO (Tablas 7 y 8).

Tabla 6. Efecto de cuatro dosis de aplicación de estiércol sobre la concentración de macronutrientes en suelo con solo estiércol (SuSolEst) y en el suelo con incorporación de la planta cobertora rábano *Raphanus sativus* L. (SuEstRF)

Dosis	**$^{\$}NH_4^+$**		**NO_3^-**		**P**		**K**	
Mg ha^{-1}	**mg kg^{-1}**							
0	26.6 a*		18.1 b		21.2 b		123 b	
10	14.1 b		24.0 ab		32.1 b		144 b	
20	14.1 b		21.3 ab		48.3 b		165 b	
40	23.3 b		33.8 a		65.3 a		225 a	
Prom. x trto	S.E ~	E.R	S.E	E.R	S.E	E.R	S.E	E. R
	17.9 A&	21.2 A	12.4A	36.2B	49.1A	34.3A	180A	148A
	P-valor							
Efecto trto	NS^		0.0002		NS		NS	
Efecto Dosis	0.018		NS		<.0001		0.007	

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. ^NS: no significativo (P-valor >0.05).
& letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.
~S.E. suelo con solo estiércol (SuSolEst) y RE suelo con estiércol y rábano (SuEstRF).
$ NH_4^+-amonio, NO_3-nitrato, P-fósforo, K-potasio.

El aumento de N- NO_3^- debido a la incorporación de rábano evidencia la capacidad que tiene la planta de cobertura para absorber grandes cantidades de N del suelo reduciendo la pérdida del nutriente a mayores profundidades y dejándolo disponible para el cultivo siguiente cuando la planta es cosechada e incorporada al suelo (Weil et al., 2009; Weil y Kremem, 2007).

Tabla 7. Efecto de las dosis de aplicación de estiércol sobre la concentración de macronutrientes en suelo (SuSolEst) y suelo con cuatro dosis de estiércol más incorporación de la planta cobertora *Raphanus sativus* L. (SuEstRF).

Dosis	**Ca$**		**Mg**		**pH**		**% MO**	
Mg ha^{-1}	mg kg^{-1}							
0	278.1 c*		56.8 b		4.00 c		2.01 b	
10	369.8 b		74.4 b		4.17 c		2.13 b	
20	431.8 ab		88.1 b		4.44 b		2.20 ba	
40	456 a		133.9 a		4.68 a		2.45 a	
	S. E~	E.R	S. E	E.R	S. E	E.R	S. E	E.R
Prom. x trt	354A&	413.7A	101.9A	74.7B	4.3A	4.4A	2.3A	2.1A
	P-valor							
Efecto trt	NS^		NS		NS		NS	
Efecto Dosis	0.0006		0.0002		<.0001		0.046	

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. ^NS: no significativo (P-valor >0.05).
& letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.
~S.E suelo con solo estiércol (SuSolEst) y RE suelo con estiércol y rábano (SuEstRF).
$ Ca-Calcio, Mg-magnesio, y %MO-porcentaje de materia orgánica.

Aplicación de estiércol de vaquería aumenta la concentración de P en el suelo desde 18.5 mg P por kg^{-1} en parcelas no enmendadas hasta 28.6 y 35.5 mg P por kg^{-1} con dosis de 10 y 20 Mg ha^{-1} respectivamente (Muir, 2001). Sin embargo, para este estudio el P en el suelo aumento desde 21.2 mg P kg^{-1} sin aplicación a 65.3 mg P kg^{-1} con dosis de 40 Mg ha^{-1}.

El N-NO_3^- aumentó de manera lineal en el suelo cuando no se usó la planta de cobertura (Figura 3). La mayor concentración de N- NO_3 fue 24.8 mg kg^{-1} con la dosis de 40 Mg ha^{-1}. El N-NH_4 mostró una relación cuadrática con la incorporación de la planta rábano.

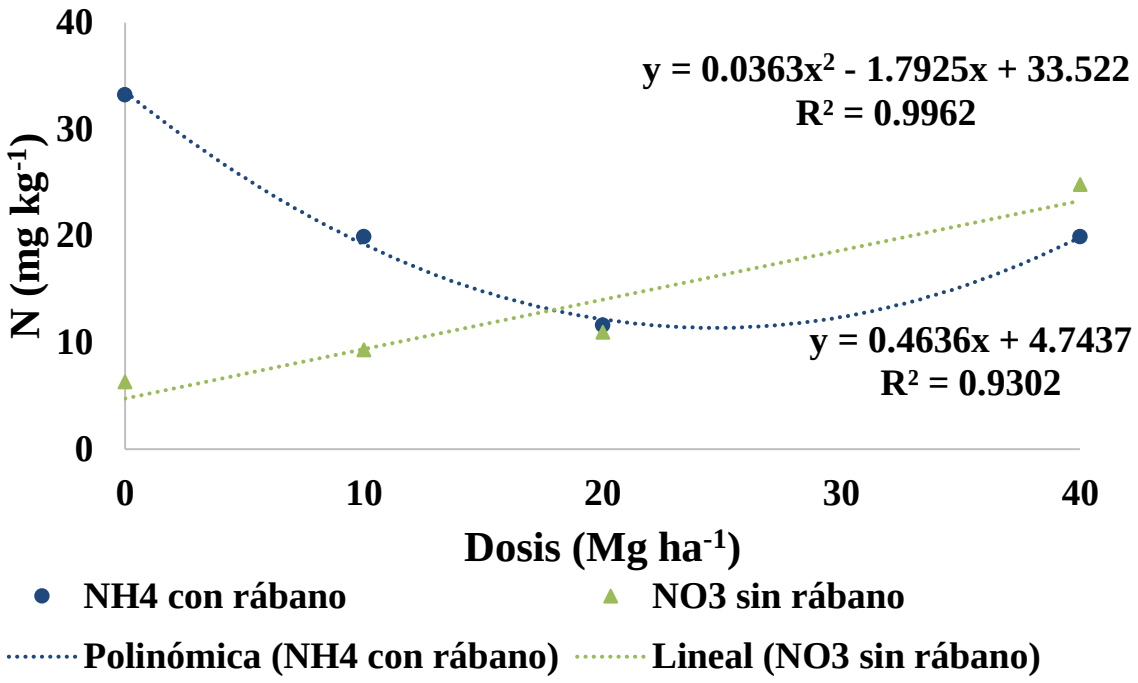

Figura 3. Relación lineal para N-NO_3 con el tratamiento solo estiércol y relación cuadrática para N-NH_4 con el tratamiento estiércol y rábano incorporado al suelo.

Las aplicaciones de estiércol tuvieron una relación lineal con las concentraciones de nutrientes para P (SuSolEst) y (SuEstRF), Mg (SuSolEst) y K (SuSolEst) (Figura 4). Las concentraciones de nutrientes aumentan a medida que se aumentan las dosis de aplicación de estiércol.

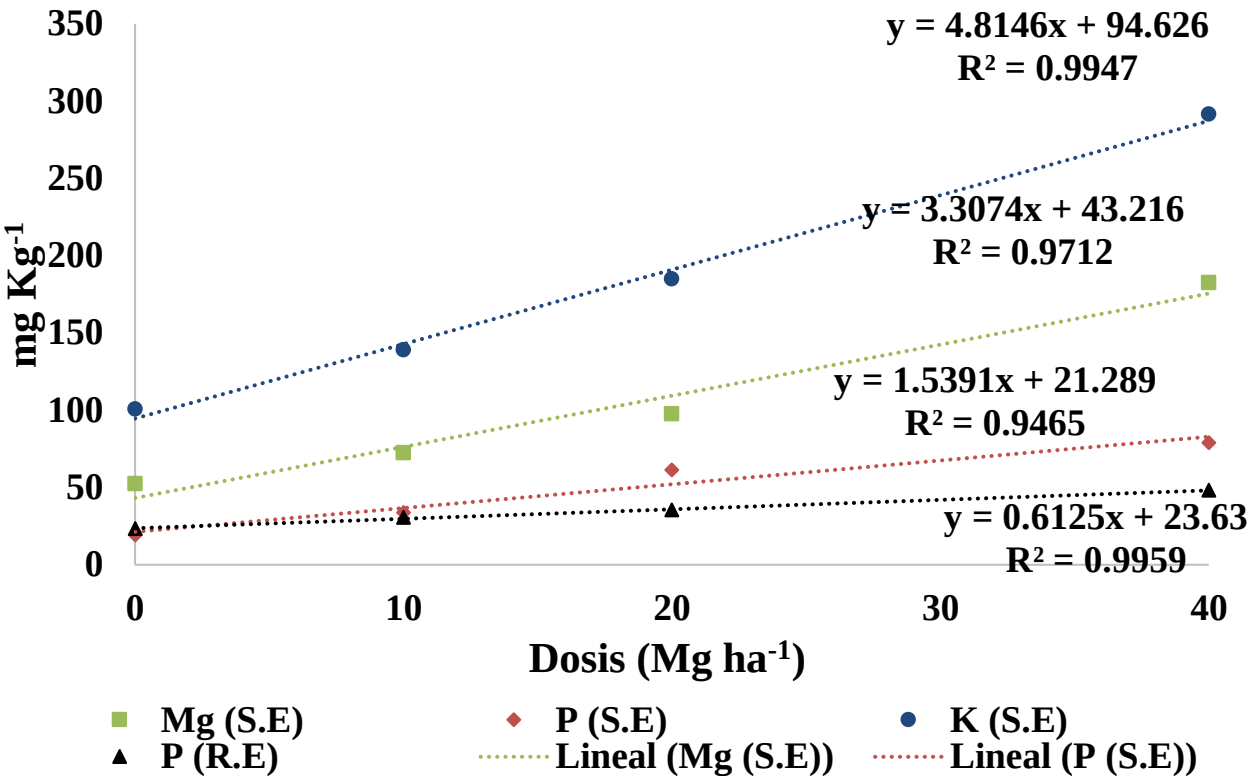

Figura 4. Relación lineal para fósforo en los dos tratamientos sin cobertora (SuSolEst) y con cobertora (SuEstRF), K y Mg en tratamiento sin cobertora (SuSolEst).

El porcentaje de materia orgánica en el suelo aumenta de manera lineal con las dosis de aplicación de estiércol cuando hay una incorporación de planta de cobertura (SuEstRF) (Figura 5). Un aumento de dosis de aplicación de estiércol aumenta el pH del suelo de manera lineal con el tratamiento (SuSolEst) (Figura 6).

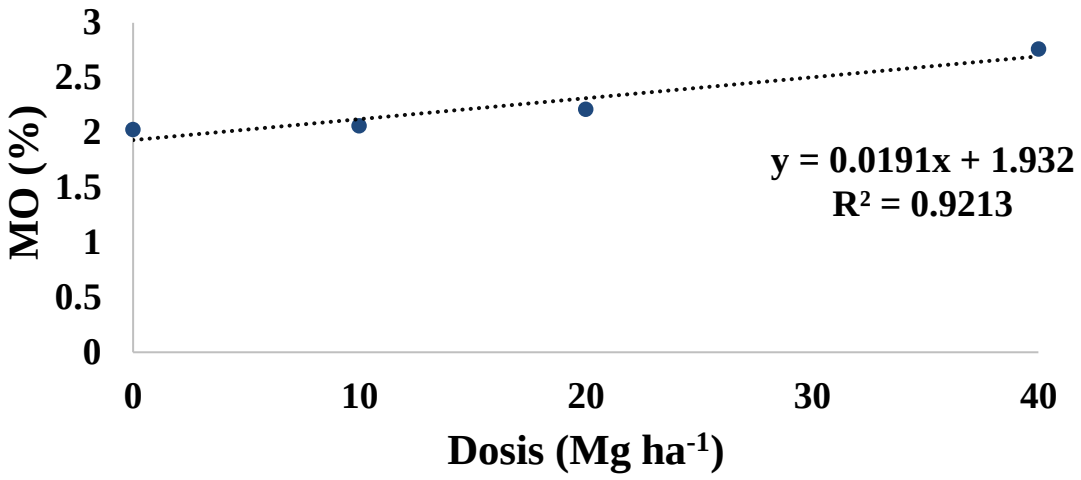

Figura 5. Relación lineal para % MO con incorporación de la planta de cobertura (SuEstRF).

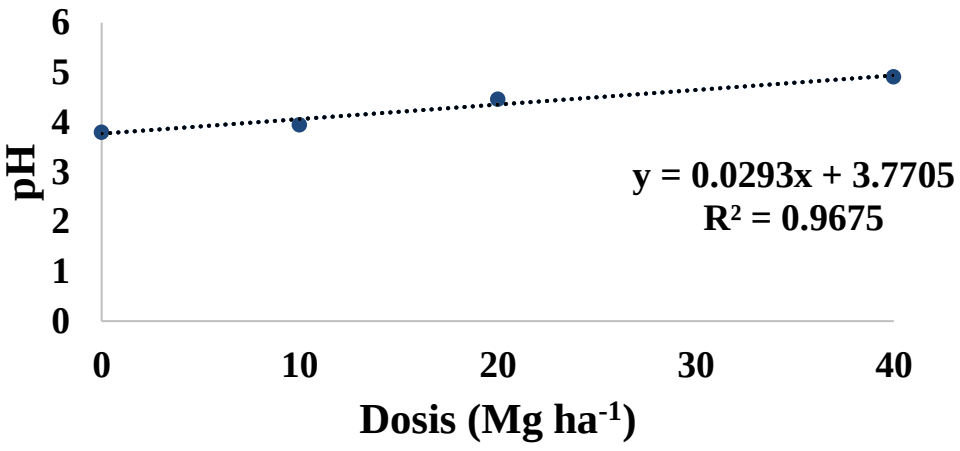

Figura 6. Relación lineal para pH del suelo con solo estiércol (SuSolEst).

5.1.10 Conclusiones

El vástago de RF presentó mayor rendimiento, concentración y absorción de nutrientes que la raíz. La absorción de N en el tejido refleja la capacidad que tiene el RF para concentrar el N en sus tejidos, por lo cual reduce las pérdidas del nutriente por lixiviación disminuyendo así la contaminación ambiental. Un aumento en las dosis de aplicación de estiércol resulta en un aumento de la concentración y absorción de P en los tejidos del rábano. El N- NO_3^- aumenta en el suelo con la incorporación de la planta de cobertura debido a una rápida descomposición de sus residuos, aumentando la fertilidad del suelo. La aplicación de estiércol se considera adecuada en las dosis probadas en este experimento debido a que incrementan en el suelo la concentración de P, Ca y % MO, aunque no aumentan significativamente el rendimiento de RF. El contenido de K, Mg y el pH fueron mayor con la dosis de aplicación de estiércol de 40 Mg ha^{-1} en las parcelas donde no se sembró rábano. La concentración de P en el suelo con aplicación de estiércol 40 Mg ha^{-1} no alcanza los niveles críticos considerados de riesgo ambiental.

6 Experimento III. Evaluación de rábano (*Raphanus sativus* L) en un Ultisol en Mayagüez bajo cuatro niveles de aplicación de estiércol bovino

6.1.1 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1.2 Localización y establecimiento de los cultivos

El tercer experimento fue desarrollado en la zona oeste de la isla (18º 13' 12.5'' N, 67º 08' 49.0''W) dentro de los predios de la finca Alzamora, Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico. La precipitación promedio anual es de 1793 mm, con una temperatura media anual de aproximadamente 25.4 º C (climate-data.org, 2017). Los suelos son de tipo Ultisol de la serie Consumo (propiedades finas, mixtas, semiactivas, isohipertérmicas, typic haplohumults) (Beinroth et al., 2003).

6.1.3 Preparación del terreno y diseño experimental

Se utilizó un área aproximada de 57.6 m^2 (64m x 0.9m). La labranza del terreno e incorporación del material vegetal fue hecha manualmente. Se usó un DBCA con cuatro repeticiones y un arreglo de parcelas divididas. La parcela principal fue el factor tiempo de siembra (siembra directa SieRaEst) y siembra un mes después de aplicación de estiércol (SimRaestInc1m) y la sub-parcela a los cuatro niveles de estiércol (0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1}). El RF fue sembrado a una densidad de 13 kg ha^{-1} y se realizaron dos siembras: 1) Siembra directamente después de la aplicación de estiércol (SieRaEst) realizada el 18 de agosto de 2016 y 2) siembra un mes después de incorporación de estiércol (SieRaestInc1m) realizada el 15 de septiembre de 2016. La subparcela tuvo un área de 1.8 m^2 (2m x 0.9m). La biomasa producida fue cosechada el 15 de octubre de 2016 dos meses después de la siembra SieRaEst y el 17 de noviembre de 2016 para (SiRaestInc1m) en un área de (0.25m^2) para análisis foliar, y la biomasa restante fue incorporado para tomar muestras de suelo.

6.1.1 Procesamiento de las muestras de rábano

La biomasa cosechada fue secada en un horno a 60º C por 72 horas, se determinó peso seco y luego se molió utilizando un molino tipo Wiley (pasar un cedazo de 1-mm). El contenido de P se extrajo por mineralización seca y se cuantificó con espectroscopia de plasma acoplado inductivamente con el instrumento Perkin Elmer Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin y Elmer, 1994). El porcentaje de N se determinó utilizando el método de Kjeldahl (Foss, 2002) el cual es basado en N total. Ambos análisis se realizaron en la Estación de Investigación de Agricultura Tropical (TARS).

6.1.2 Análisis de suelo

Se tomó una muestra compuesta de suelo por parcela al azar en forma de zigzag en una profundidad de 15 cm. Se realizaron tres muestreos en total: 1) un mes después de incorporar el rábano en parcelas donde este fue sembrado inmediatamente después de aplicar el estiércol, realizado 17 de noviembre de 2016 (SuEnSieRaEst), 2) un mes después de incorporar el estiércol sin rábano (SuEstInc1m) realizado el 15 de septiembre de 2016 y 3) un mes después de incorporar el rábano al suelo en las parcelas en donde se sembró el rábano un mes después de la incorporación de estiércol, realizado el 15 de diciembre de 2016 en (SuEstInc1myRFInc). Para ver los efectos en tiempo de la incorporación del estiércol, un mes antes de sembrar Versus sembrar inmediatamente después de aplicar el estiércol.

Las muestras de suelo fueron secadas, molidas y analizadas en TARS para determinar las concentraciones de N, P, K, Mg, Ca, pH y MO. El N-NO_3^- y N-NH_4^+ se determinaron por destilación al vapor siguiendo la metodología de Benton (2001) y Sparks (2007). Los demás nutrientes se determinaron por el Mehlich III según Benton (2001) el cual ha sido utilizado en estudios de fertilidad para un amplio rango de tipos de suelos y tiene capacidad para determinar varios nutrientes. La MO se determinó por el método Walkley Black de Benton (2001) y Sparks (2007).

6.1.3 Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se determinaron mediante un ANOVA utilizando un modelo mixto (GLIMMIX) con el paquete estadístico (SAS versión 9.4®; SAS 2009). Tratamiento con efectos significativos ($P < 0.05$), se compararon utilizando la prueba LSD de Fisher. Análisis de regresión se realizaron utilizando los niveles de estiércol como variable independiente y como variables dependientes el rendimiento, la concentración y absorción de P, N, Ca y B en el tejido. En el suelo las variables independientes fueron las dosis aplicadas de estiércol y las variables dependientes la concentración de macronutrientes N-NO_3^-, N-NH_4^+, P, K, Mg, Ca, pH y MO. Análisis de contrastes fueron realizados para comparar el efecto de las dosis de aplicación de estiércol sobre la absorción y concentración de nutrientes en el tejido de rábano.

6.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1.5 Experimento III

6.1.6 Análisis de tejido de rábano en un suelo Ultisol bajo cuatro dosis de aplicación de estiércol 0, 10, 20 y 40 Mg ha^{-1}

El RF sembrado en parcelas inmediatamente después de la aplicación del estiércol (SieRaEst) muestra mayor concentración de P 5.67 g kg $^{-1}$ en sus tejidos que cuando se sembró un mes después de haber aplicado el estiércol (SimRaestInc1m) 4.74 g kg $^{-1}$. Este mismo comportamiento se presenta para concentración de Ca 10.13 g Ca kg $^{-1}$ y 3.24 g Ca kg $^{-1}$ y absorción 11.6 kg Ca ha^{-1} y 4.6 kg Ca ha^{-1} en SieRaEst y SimRaestInc1m respectivamente. La concentración de B fue 12.6 g kg^{-1} SieRaEst y 9.30 g kg^{-1} para SimRaestInc1m ($P<0.05$).

Dosis de aplicación de estiércol tuvieron un efecto significativo para rendimiento, con la dosis de 40 Mg ha^{-1} tuvo un mayor rendimiento 2,080 kg ha^{-1} en promedio para SieRaEst y SimRaestInc1m. Las dosis de estiércol también afectaron la absorción de nutrientes en el tejido de rábano mostrando mayor absorción 10.7 kg ha^{-1}, 29 kg ha^{-1}, 12.4 kg ha^{-1} y 24.6 kg ha^{-1} para P, N, Ca y B respectivamente con la dosis de 40 Mg ha^{-1} siendo significativamente

diferente con las demás dosis. Efectos principales de dosis y tiempo de siembra se muestran en la (Tabla 8).

Tabla 8. Efecto de dosis de estiércol sobre rendimiento, concentración y absorción de nitrógeno y fósforo en dos tiempos de siembra de rábano (*Raphanus sativus* L).

Dosis	**RMS$**		**P**				**N**			
Mg ha^{-1}	Kg ha^{-1}		[1]Con. (g Kg^{-1})		[2]Abs. (Kg ha^{-1})		Con. (g Kg^{-1})		Abs. (Kg ha^{-1})	
0	770 c*		5.30 a		4.19 c		11.66 b		9.4 c	
10	1030 b c		5.04 a		5.39 b c		12.54 ab		13.7 b c	
20	1330 b		5.33 a		6.81 b		15.75 a		20.4 b	
40	2080 a		5.11 a		10.67 a		13.70 ab		29 a	
	SD	SI	SD	SI	SD	SI	SD	SI	SD	SI
	1165 A&	1440 A	5.67 A	4.72 B	6.66 A	6.87 A	13.1 A	13.7 A	16.2 A	20.1 A
Tratamiento	NS^		0.0025		NS		NS		NS	
Dosis	<.0001		NS		<.0001		NS		0.0002	

[1] Con- concentración

[2] Abs- Absorción

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. ^NS: no significativo (P-valor >0.05).

& letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.

~ SD-SieRaEst siembra de rábano con estiércol, SI- SimRaestInc1m siembra de rábano con un mes de incorporado el estiércol.

$ RMS- rendimiento de materia seca, P-fósforo, N-nitrógeno,

Tabla 8. Continuación Efecto de dosis de estiércol sobre concentración y absorción boro y calcio en dos tiempos de siembra de rábano (*Raphanus sativus* L).

Dosis	**$^{\$}$Ca**		**B**	
Mg ha^{-1}	^{1}Con. (g Kg^{-1})	^{2}Abs. (Kg ha^{-1})	Con. (g Kg^{-1})	Abs. (Kg ha^{-1})
0	7.17 a*	5.22 c	10.3 a	8.04 c
10	6.42 a	6.85 b c	10.5 b	11.2 c b
20	7.10 a	8.07 b	11.3 ab	14.3 b
40	6.03 a	12.4 a	11.7 a	24.6 a

	SD$^{\sim}$	SI	SD	SI	SD	SI	SD	SI
	10.1 A$^{\&}$	3.24 B	11.6 A	4.62 B	12.6 A	9.30 B	15.4 A	13.6 A
Tratamiento	0.0099		0.0245		0.0056		NS	
Dosis	NS$^{\wedge}$		<.0001		NS		<.0001	

[1] Con- Concentración
[2] Abs- Absorción
*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. $^{\wedge}$NS: no significativo (P-valor >0.05).
$^{\&}$ letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.
$^{\sim}$ SD-SieRaEst siembra de rábano con estiércol, SI- SimRaestInc1m siembra de rábano con un mes de incorporado el estiércol.
$^{\$}$ Ca-Calcio B-Boro.

Solo existe interacción de dosis y época de siembra para absorción de Ca en donde con la dosis de 40 Mg ha^{-1} hay mayor absorción 18.6 kg Ca ha^{-1} cuando el RF se siembra inmediatamente después de aplicado el estiércol (Tabla 9).

Tabla 9. Efectos de la interacción dosis * época de siembra (siembra directa (SD) y siembra un mes después de incorporado el estiércol (SI) sobre para absorción de Ca en rábano (*Raphanus sativus* L)

Tratamiento	**Dosis de estiércol**			
	Mg ha^{-1}			
	0	10	20	40
S. D~	7.12 cd*	9.67 b c	12 b	18.6 a
S. I	3.32 d	4.03 d	4.98 cd	6.13 cd

abc Letras diferentes indican diferencia significativa P< 0.05
~ SD-SieRaEst siembra de rábano con estiércol, SI- SimRaestInc1m siembra de rábano con un mes de incorporado el estiércol.

Contrastes para tejido

El análisis de contraste para tejido muestra diferencias significativas comparando sin aplicación de estiércol versus aplicación de estiércol para rendimiento, concentración y absorción de P y solo para absorción de N, Ca y B. Comparando entre dosis altas y bajas hay diferencias significativas para rendimiento, concentración y absorción de P y B y solo absorción para N y Ca, teniendo estos mismos resultados al comparar aplicación de dosis alta de estiércol versus sin aplicación de estiércol. Todas las variables evaluadas muestran diferencias significativas (Tabla 11).

Tabla 10. Contrastes para rendimiento, concentración y absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca) y boro (B) para rábano (*Raphanus sativus* L) sembrado inmediatamente después de aplicación de estiércol y sembrado un mes después de aplicación de estiércol

Contrastes	P valor [&](RMS)	P valor (P) [*]Conc.	P valor (P) Abs.	P valor (N) Conc.	P valor (N) Abs.	P valor (Ca) Conc.	P valor (Ca) Abs.	P valor (B) Conc.	P valor (B) Abs.
Sin Est. Vs con Est.	0.0002	0.0088	0.0011	>0.05	0.0009	>0.05	0.0005	>0.05	0.0009
Dosis altas Vs Dosis bajas	<.0001	0.2861	<.0001	>0.05	<.0001	>0.05	<.0001	0.0105	<.0001
Sin Est. Vs Dosis de 40	<.0001	0.0037	<.0001	>0.05	<.0001	>0.05	<.0001	0.0241	<.0001
S.D Vs S.I	>0.05	<.0001	>0.05	>0.05	>0.05	0.0099	0.0245	0.0056	>0.05

P valor > a 0.05 indican no diferencia significativa con la prueba LSD de Fisher.

[*] Con-concentración, Abs-Absorción

[&]RMS-rendimiento de materia seca, P- fósforo, N-nitrógeno, Ca-calcio, B-boro

Regresión para tejido

Existe relación lineal entre el rendimiento de materia seca, la absorción de P, absorción de N, absorción de Ca y absorción de B con las dosis de aplicación de estiércol evaluadas. Cada variable aumenta de manera lineal a medida que se aumenta la dosis de aplicación de estiércol (Figuras 7- 8- 9- 10 y 11).

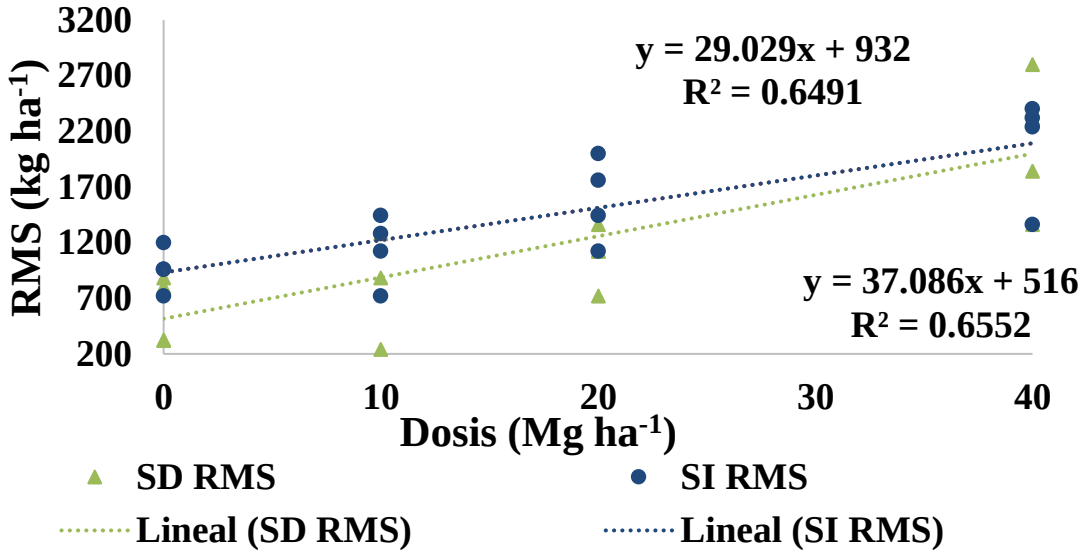

Figura 7. Rendimiento de materia seca en dos etapas de siembra de RF SD-SieRaEst y SI-SimRaestInc1m y cuatro dosis de aplicación de estiércol.

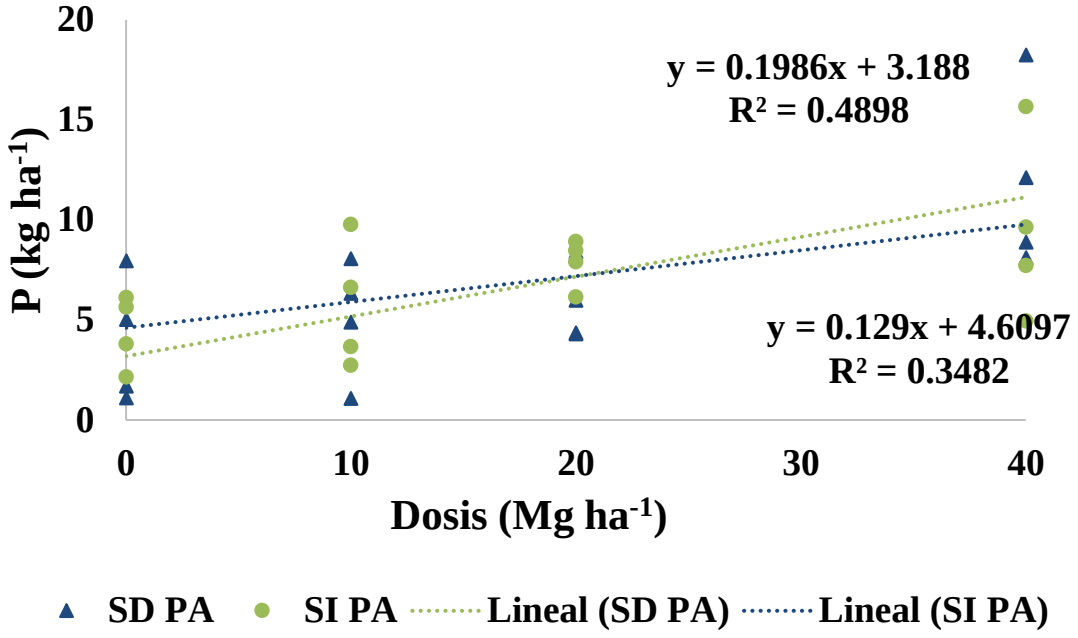

Figura 8. Absorción de fósforo en dos etapas de siembra de RF SD-SieRaEst y SI-SimRaestInc1m y cuatro dosis de aplicación de estiércol.

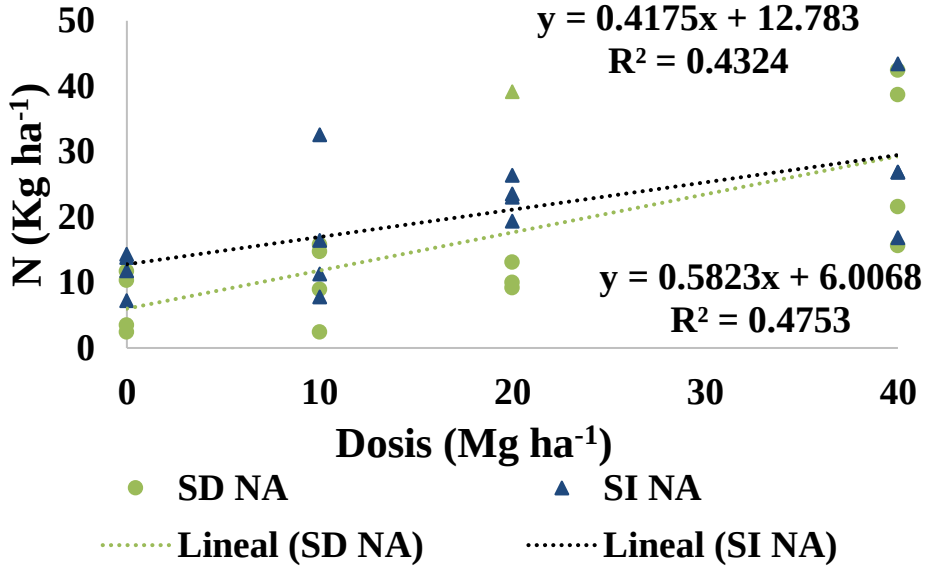

Figura 9. Absorción de nitrógeno en rábano con dos etapas de siembra SD-SieRaEst y SI-SimRaestInc1m y cuatro dosis de aplicación de estiércol.

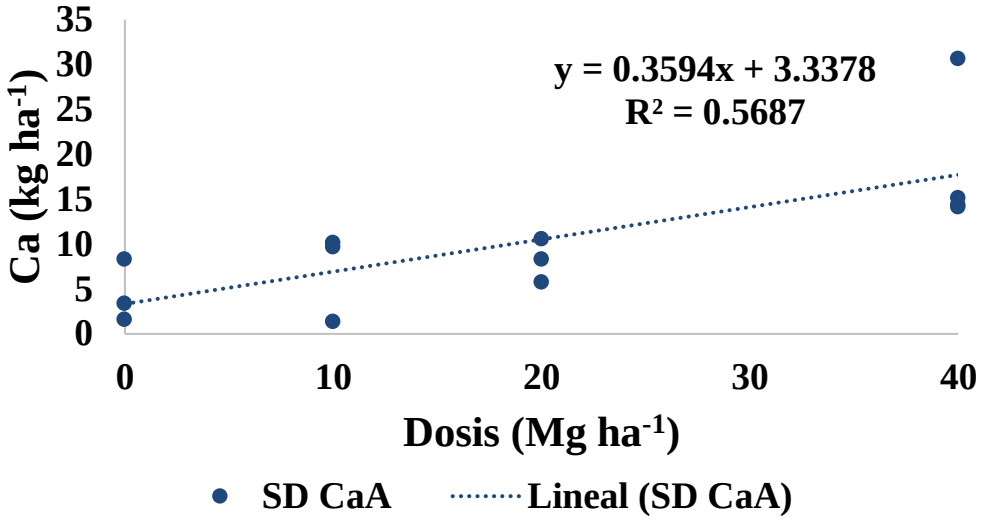

Figura 10. Absorción de calcio en rábano con el tratamiento S.D- SieRaEst

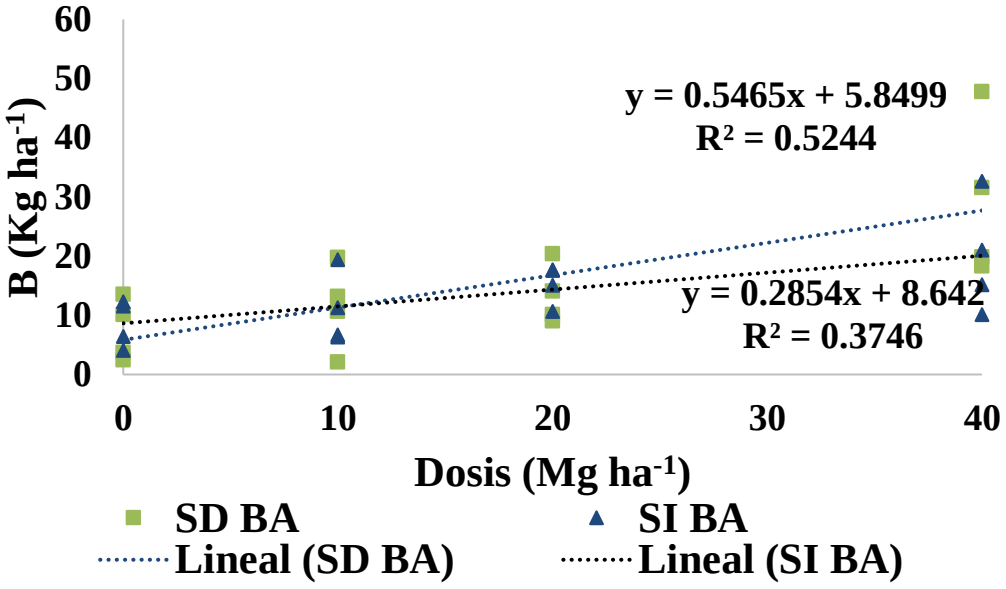

Figura 11. Absorción de boro en rábano con el tratamiento SD-SieRaEst y SI-SimRaestInc1m en cuatro dosis de aplicación de estiércol.

Sembrar la planta cobertora inmediatamente después de aplicación de estiércol, le permitió un mejor aprovechamiento de los nutrientes B, Ca y P contenidos en el estiércol. Es importante resaltar la importancia del uso de plantas de cobertura que absorban rápidamente los nutrientes del suelo reduciendo la perdida de los mismos y la contaminación ambiental, además de conservar su fertilidad.

Al igual que en el experimento anterior en un suelo Oxisol el RF responde a la aplicación de estiércol en un suelo ultisol absorbiendo mayor cantidad de los nutrientes N, P, Ca y B con la dosis 40 Mg ha^{-1}. La absorción de Ca, fue mayor con la mayor dosis de aplicación de estiércol en el tratamiento SieRaEst por lo que no es necesario esperar un tiempo para sembrar el rábano si no que por el contrario se recomienda sembrarlo inmediatamente para que pueda aprovechar rápidamente los nutrientes contenidos en el estiércol.

En este experimento no fue posible evaluar la concentración y absorción de nutrientes por vástago y raíz de la planta debido a que la raíz no tuvo un buen desarrollo en el suelo ultisol como en el Oxisol por lo cual los análisis de tejido fueron realizados en la planta completa al igual que en el primer experimento. El rendimiento mostrado en este estudio fue bajo 2,080 kg ha^{-1} con la dosis de 40 Mg ha^{-1} comparado con el estudio en Isabela 5,345 kg ha^{-1} para vástago y 978 kg ha^{-1} para raíz. Sin embargo, para este experimento hay mayor concentración y absorción de P, pero menor concentración y absorción de N. La concentración y absorción de N puede estar más relacionado al rendimiento de materia seca, mientras que la absorción de P está más relacionado a la concentración de P en el tejido respondiendo efectivamente a la aplicación de estiércol. A pesar de que la raíz no se desarrolló profundamente fue suficiente para absorber el P disponible debido a que este se concentra mayormente en la superficie. Por el contrario, la absorción de N fue menor debido a que este nutriente se concentra más profundo en el suelo (Ho et al., 2005).

6.1.6.1 Análisis de suelo con aplicación de estiércol y siembra directa de rábano y siembra de rábano con un mes después de incorporado el estiércol

El análisis de varianza solo muestra efecto del tratamiento para la concentración de K en el suelo, este se halla en menor concentración 379 mg kg^{-1} en el suelo con el tratamiento SER. Las dosis de aplicación de estiércol tuvieron efecto en la concentración de nutrientes P y K con la dosis de 40 Mg ha^{-1} donde se pueden encontrar mayor concentración de estos nutrientes en el suelo 294 mg kg^{-1} y 497 mg kg^{-1} para P y K respectivamente (Tabla 12).

Efecto de dosis también se evidencia para Ca, Mg, pH y % de MO donde la dosis de 40 Mg ha^{-1} se observan las mayores concentraciones 4,837 mg kg^{-1}, 564 mg kg^{-1} para Ca y Mg respectivamente, se aumenta el pH a 6.86 y el porcentaje de MO a 3.57 siendo estos valores significativamente diferentes a las demás dosis evaluadas (Tabla 13).

Regresión

Existe relación lineal entre concentración de P, K y Mg en el suelo y las dosis de aplicación de estiércol en los tres tratamientos (SuEnSieRaEst, SuEstInc1m y SuEstInc1myRFInc), para K en SuEstInc1myRFInc mostró menor concentración del nutriente en el suelo. Para Ca y pH existe relación lineal solo para los tratamientos SuEnSieRaEst y SuEstInc1myRFInc y las cuatro dosis de aplicación de estiércol. Para MO existe relación lineal para los tratamientos SuEnSieRaEst y SuEstInc1m (Figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17).

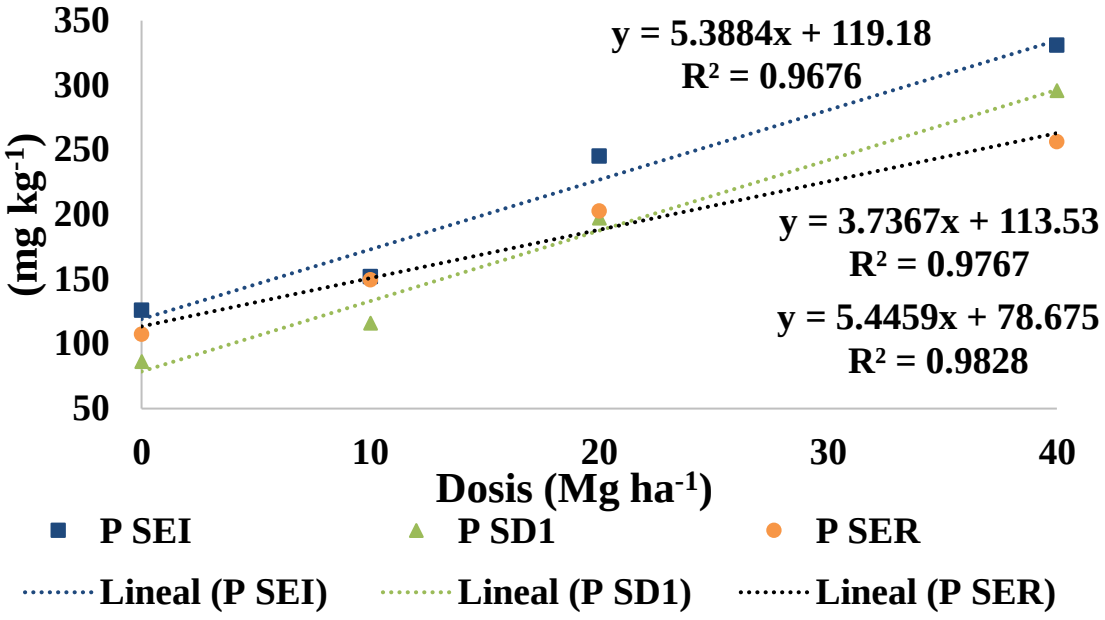

Figura 12. Relación lineal para concentración de fósforo en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos SD1(SuEnSieRaEst), SEI (SuEstInc1m) y SER (SuEstInc1myRFInc).

Tabla 11. Efecto de las dosis de aplicación de estiércol y la incorporación de planta cobertora rábano (*Raphanus sativus* L) en la concentración de nutrientes en el suelo con diferentes tiempos de incorporación.

Dosis	**NH_4^+ $**				**NO_3^-**			**P**			**K**	
Mg ha^{-1}	mg kg^{-1}											
0		17.2 a			14.4a			106.7c*			354.2c	
10		16.6 a			15.5a			139.1c			379.8c	
20		14.9 a			13.8a			215.1b			442.4b	
40		16.6 a			13.3a			294.3a			497.0a	
	SD1	SEI	SER	SDI	SEI	SER	SD1	SEI	SER	SD1	SEI	SER
Prom x trt	19.1 A&	17.0AB	12.9 B	16.6A	14.5A	11.6A	173.98B	213.5A	178.9AB	406.8AB	469.5A	379B
	p-valor											
Efecto trt		NS^			NS			NS			0.0383	
Efecto Dosis		NS			NS			<.0001			<.0001	

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. ^NS: no significativo (P-valor >0.05).

& letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.

~ SD1-(SuEnSieRaEst) suelo en siembra de rábano con estiércol, SEI-(SuEstInc1m) suelo con estiércol incorporado de un mes, SER-(SuEstInc1myRFInc) suelo cono estiércol incorporado de un mes y rábano incorporado.

$ NH_4^+-amonio, NO_3^--nitrato, P-fósforo, K-potasio.

Tabla 12. Efecto de dosis de aplicación de estiércol sobre las concentraciones de Calcio, Magnesio, pH y % de materia orgánica en el suelo en tres tiempos de incorporación de estiércol y planta de cobertura.

Dosis Mg ha^{-1}	**Ca** $^{\$}$			**Mg**			**pH**			**% MO**		
	mg kg^{-1}											
0	3808 c*			387.8 d			6.59 c			3.13 b		
10	4334 b			429.9 c			6.65 bc			3.20 b		
20	4423 b			486.9 b			6.79 ab			3.29 b		
40	4837 a			563.6 a			6.86 a			3.57 a		
	SD1$^{\sim}$	SEI	SER	SD1	SEI	SER	SD1	SEI	SER	SD1	SEI	SER
Prom. x trt	4289.6bA$^{\&}$	4574A	4188.5B	470A	482.9A	448.2A	6.68A	6.90A	6.59A	3.43 A	3.39 A	3.08 A
	p-valor											
Efecto trt	NS$^{\wedge}$			NS			NS			NS		
Efecto Dosis	0.0006			<.0001			0.0122			0.0025		

*Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher. $^{\wedge}$NS: no significativo (P-valor >0.05).

$^{\&}$ letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa en la prueba LSD de Fisher.

$^{\sim}$ SD1-(SuEnSieRaEst) suelo en siembra de rábano con estiércol, SEI-(SuEstInc1m) suelo con estiércol incorporado de un mes, SER-(SuEstInc1myRFInc) suelo cono estiércol incorporado de un mes y rábano incorporado.

$^{\$}$ Ca-calcio, Mg-magnesio, % MO- porcentaje de materia orgánica.

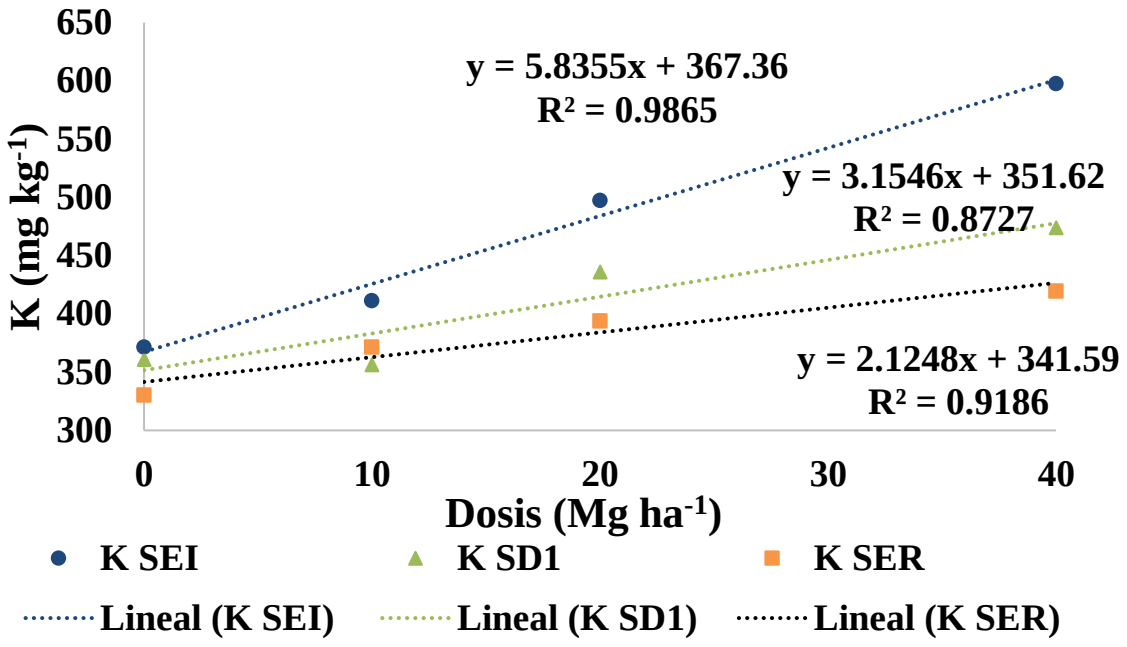

Figura 13. Relación lineal para concentración de potasio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos SD1(SuEnSieRaEst), SEI (SuEstInc1m) y SER (SuEstInc1myRFInc).

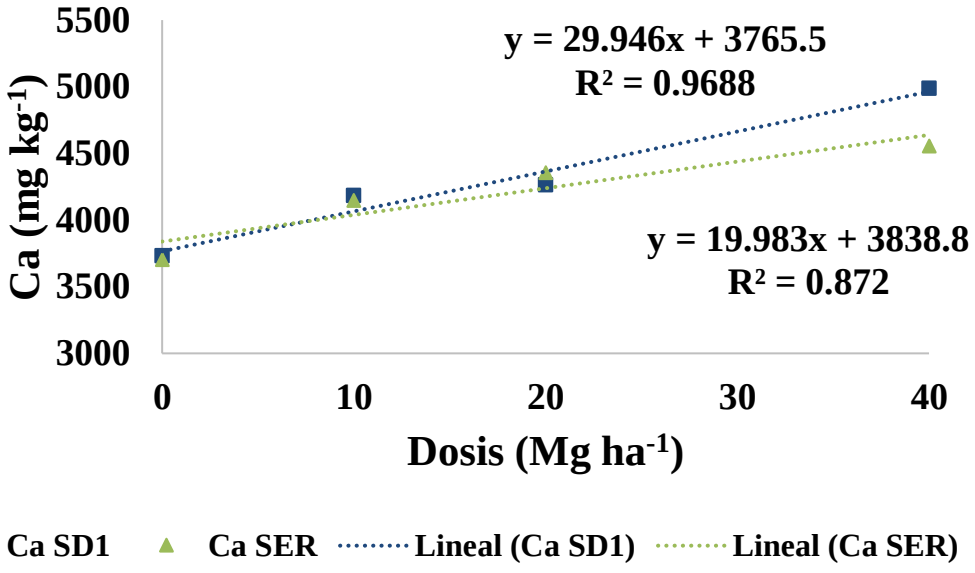

Figura 14. Relación lineal para concentración de Calcio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos SD1(SuEnSieRaEst) y SER (SuEstInc1myRFInc).

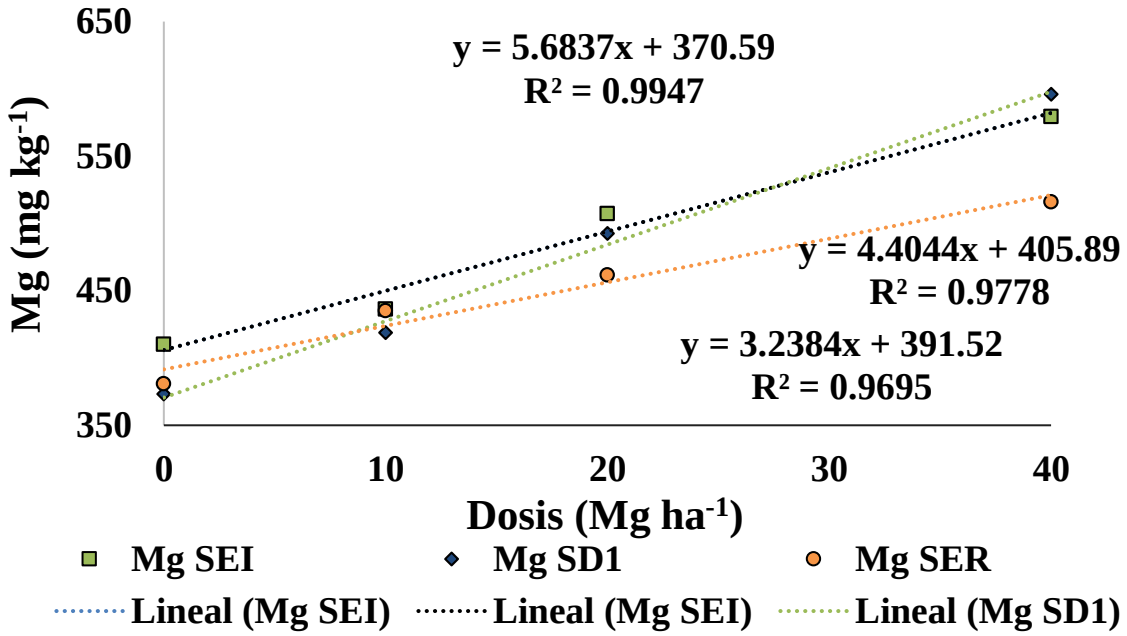

Figura 15. Relación lineal para concentración de Magnesio en el suelo con cuatro dosis de aplicación de estiércol y tres tratamientos SD1(SuEnSieRaEst), SEI (SuEstInc1m) y SER (SuEstInc1myRFInc).

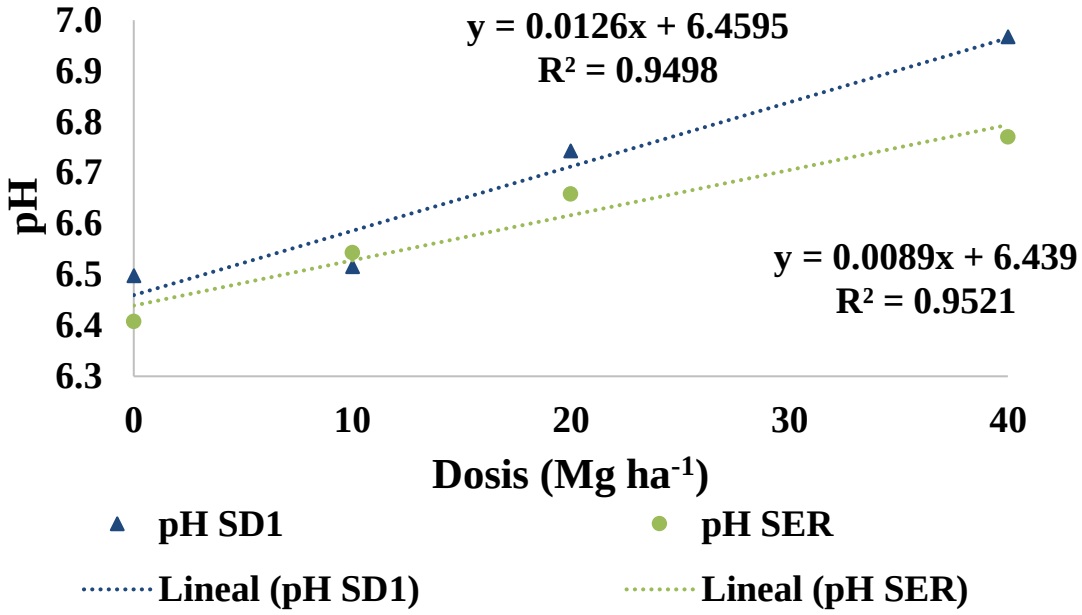

Figura 16. Relación lineal para pH con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos SD1(SuEnSieRaEst) y SER (SuEstInc1myRFInc).

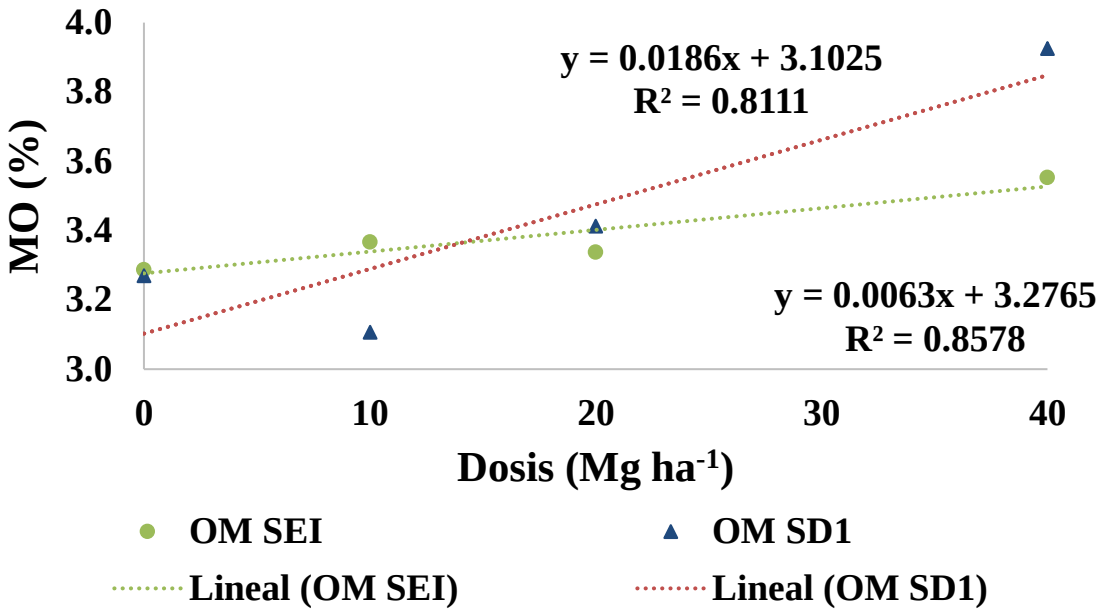

Figura 17. Relación lineal para porcentaje de materia orgánica con cuatro dosis de aplicación de estiércol y dos tratamientos SD1(SuEnSieRaEst) y SEI (SuEstInc1m).

6.1.7 CONCLUSIONES

El RF presenta mayor concentración de P y B y mayor concentración y absorción de Ca en sus tejidos cuando se siembra inmediatamente después de la aplicación de estiércol. Mayor rendimiento y absorción de P, N, Ca y B en el tejido del rábano se evidencia con la dosis de aplicación de estiércol de 40 Mg ha^{-1}. En un suelo Ultisol de la serie Consumo se presenta menor rendimiento de materia seca de rábano y como resultado menor concentración de N, pero se evidencia mayor concentración y absorción P en el tejido que en un suelo Oxisol de la serie Coto. El tiempo de aplicación de estiércol solo tuvo efecto para el K en el suelo disminuyendo cuando se siembra el rábano un mes después de haber incorporado el estiércol. La concentración de P en el suelo con aplicación de estiércol de 40 Mg ha^{-1} es alta, sobrepasa los niveles críticos de riesgo para contaminación ambiental por lo cual no se recomienda aplicar más de 10 Mg ha^{-1}. No es necesario esperar un mes después de la aplicación de estiércol para sembrar, pensando en que habrá mayor disponibilidad de nutrientes, por el contrario, se recomienda sembrar inmediatamente la planta de cobertura para reducir las pérdidas de los nutrientes contenidos en el estiércol y evitar de esta manera contaminación ambiental. Se evidencian las ventajas del uso de plantas de cobertura para mejorar las propiedades químicas del suelo ya que son de rápido crecimiento y aprovechan los nutrientes inmediatamente disponibles reduciendo su perdida, evitando contaminación de las fuentes de agua, mejorando la fertilidad del suelo al hacerlos disponibles para los cultivos principales debido a una rápida descomposición de sus residuos.

7 Anexos

Tabla 13. Características del análisis de suelo hecho al estiércol aplicado en Isabela y Alzamora y el suelo analizado en ambos lugares antes de realizar el experimento.

Muestra	$CaCl_2$	Agua	MO	NO_3^-	NH_4^+	Ca	K	Mg	Mn	P
	pH		%	mg kg^{-1}						
E Isabela[&]	8.48	8.8	11.9	109	27	14550	11360	6668	179.8	6797
E Alzamora[$]	8.46	8.85	11.89	19.95	26.6	9988	9560	3131	91.57	6668
Suelo Isabela	-	5.34	12.4	-	-	437	41.4	84	-	8.03*
Suelo Alzamora	6.74	7.54	3.29	6.65	6.65	3751	339.5	367.2	75.02	89.72

[*] Fósforo determinado por método Olsen

[&] Estiércol aplicado en Isabela

[$] Estiércol aplicado en Alzamora

[-] No determinado

Tabla 14. Niveles críticos de P en el suelo con los cueles se puede inferir su concentración en agua

Categoría	P (mg kg^{-1})	P agua [&]
Medio	ND*	Baja respuesta en rendimiento de un cultivo al aplicar fertilizante orgánico e inorgánico.
Alto	<167	No respuesta en rendimiento. Corresponde a fosforo disuelto en agua de 0.5mg /l.
Muy Alto	168-223	Valores de P disuelto en agua de 0.5 - 1 mg/l de P
Extremadamente Alto	>253	Valores de P disuelto en agua > 1 mg/l P

* Niveles críticos agronómicos para Mehlich 3 no se reportan para Puerto Rico, pero extrapolando de Olsen y Bray 1 estos niveles están entre 47 y 32 mg kg^{-1} de P.

[&] P- fósforo en agua, establecido por la EPA como concentración límite de P de 1mg L^{-1} en los puntos de descarga hacia aguas superficiales. Este valor es también es propuesto como límite en la escorrentía en campos agrícolas (Sotomayor et al., 2004).

8 LITERATURA CITADA

Barba, L.E. (2002). *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición.* Universidad del Valle Facultad de Ingenierías Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente Área Académica Ingeniería Sanitaria y Ambiental Santiago de Cali, Colombia.

Beinroth, F., Engel, R., Lugo, J., Santiago, C., Ríos, S., & Brannon, G. (2003). *Updated taxonomic classification of the soils of Puerto Rico*, 2002. Bulletin 303. University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. College of Agricultural Sciences Agricultural Experiment Station. San Juan, PR.

Benton, J. (2001). Laboratory guide conducting soil test and plant analysis. Methods of soil analysis. SSSA book series No. 5/edited by D.L Sparks.

Björkman, T., & Shail J.W. (2010). Cornell cover crop guide for forage radish. Cornell University. EE. UU.

Brown, B. D., Gibson, R.C., Geary, B., & Morra, M.J. (2008). Biofumigant biomass, nutrient content, and glucosinolate response to phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 743–757. doi: 10.1080/01904160801926848

Brown, B & Griggs, T. (2009). Double- cropped winter forages. Bulletin. 869. University of Idaho. EE. UU.

Cardona, A. J. (2003). Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del rio la soledad, valle de Ángeles, Honduras.

Carpenter, S., Caraco, N. F., Correll, D.V., Howarth, R.W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Contaminación no puntual de aguas superficiales con fósforo y nitrógeno. *Tópicos en ecología*. 3, 1-13.

Chapman, B., Salmon, D., Dyson, C., & Blackley, K. (2005). Triticale production and utilization manual. Spring and Winter Triticale for Grain, Forage and Value-added. Alberta agriculture, food and rural development.

Chen, G., & Weil, R.R. (2009). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil*. Doi:10.1007/s11104-009-0223-7

Clark, A. (Ed.) (2007). Managing cover crops profitably, 3rd ed. National SARE Outreach Handbook Series Book 9. National Agricultural Laboratory: Beltsville, MD.

Climate-data.org. (2017). Climate-data.org. Clima Isabela. Recuperado de https://es.climate-data.org/location/766542/.

Dean, J.L., & Weil, R.R. (2009). Brassica Cover Crops for Nitrogen Retention in the Mid-Atlantic Coastal Plain. *Journal of Environmental Quality*. 38, 520-528. doi:10.2134/jeq2008.0066

Dietz, F. J. (1991). Towards a sustainable and efficient use of manure in agriculture: The Dutch case. *Environmental and Resource Economics* 1, 313-332.

Environmental Agency Protection [EPA]. (2016). Agua potable: La EPA necesita adoptar medidas adicionales para garantizar que los pequeños sistemas de agua comunitarios señalados como graves infractores logren cumplir con las normas. N. º de informe: 16-P-0108.https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-4/documents/20160413-16-p-0108_spanishversion_0.pdf.

Foss Tecator. (2002) The determination of nitrogen according to Kjeldahl using block digestión and steam distillation, Aplication Note, Höganäs, Sweden.

Gieske, M. F., Ackroyd, V. J., Baas D. G., Mutch D.R., Wyse D.L., & Durgan B.R. (2016). Brassica cover crop effects on nitrogen availability and oat and corn yield. *Agronomy Journal*, 108,151–16. doi:10.2134/agronj2015.0119

Grinsted, M.J., Hendley, M.J., White, R.E., & Nye, P. H. (1982). Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (Brassica napus var. emerald) seedlings: pH change and the increase in P concentration in the soil solution. *The New Phytologist*, *91*(1), 19–29. http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1982.tb03289.x

Hedley, M. J., Nye, P. H., & White, R. E. (1982). Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. emerald) seedlings ii. Origin of the pH change. *The New Phytologist*, *91*(1), 31–44. http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1982.tb03290.x

Ho, M. D., Rosas, J. C., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2005). Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Funtional Plant Biology*. 32, 737-748.

Kilcer, T., Cherney, J., Czymmek, K., & Ketterings, K. (2010). Winter triticale forage. Agronomy fact sheet series, Cornell university cooperative station. College of Agriculture and Life Sciences.

Lawley, Y.E., Weil, R.R., & Teasdale, J.R. (2011). Forage Radish Cover Crop Suppresses Winter Annual Weeds in Fall and Before Corn Planting. *Agronomy Journal*. 103,

137-144. doi:10.2134/agronj2010.0187

Longoria, C. (2000). Fertilización orgánica con estiércol Bovino en diferentes fechas y dosis de aplicación en maíz blanco Hualahuises. Tesis presentada para optar el grado de maestro en ciencias en producción agrícola. Universidad autónoma de Nuevo león. México.

Manitoba agriculture, food and rural initiatives. (2013). Effects of manure and fertilizer on soil fertility and soil quality. Recuperado de http://www.gov.mb.ca/agriculture/environment/nutrient-management/pubs/effects-of-manure%20-fertilizer-on%20soil%20fertility-quality.pdf.

Magdoff, F., & Van, E.H. (2009). Building soils for better crops, sustainable soil management. Sustainable Agriculture Publications: Waldorf, MD.

Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of the Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15, 1409–1416.

Meléndez, G., & Soto, G. (2003). Taller de abonos orgánicos. *Cámara Nacional de Insumos Agropecuarios No Sintéticos.* Recuperado de http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Taller%20Abonos%20Org%C3%A1nicos.pdf

Mendoza, M., Cortez, E., Rivera, J., Rangel, J., Andrio, E., & Cervantes, F. (2011). Época y densidad de siembra en la producción y calidad de semilla de triticale (x triticosecale wittmack). *Agronomía Mesoamericana*, 22 (2): 309-316.

Mills, H. A., & Benton, J. (1996). Plant analysis handbook II: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. MicroMacro Publishing, Inc. Athens, Georgia, United States of America.

Miller, M. H., Beauchamp, E. G., & Lauzon, J. D. (1994). Leaching of nitrogen and phosphorus from the biomass of three cover crop species. *Journal Environmental Quality*, 23: 267- 272. doi:10.2134/jeq1994.00472425002300020007x

Muir, J. (2001). Dairy compost, variety and stand age effects on kennaf forage yield nitrogen and phosphorus concentraction and uptake. *Agronomy Journal*. 93, 1169-1173.

Muir, J. (2009). Phytoremediation of excessively high phosphorus soils and subsequent reduced phosphorus runoff into the North Bosque River. Final report. Funding provided through a Clean Water Act §319(h) Nonpoint Source Grant from the Texas

State Soil and Water Conservation Board and the U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de https://www.tsswcb.texas.gov/en/managementprogram/phytonbr

Mullins, G. (2009). Phosphorus, agriculture & the environment. Virginia Cooperative Extension. Virginia Polytechnic Institute and State University. United States of America. https://www.pubs.ext.vt.edu/content/dam/pubs_ext_vt_edu/424/424-029/424-029_pdf.pdf

Olson, B. M., McKenzie, R. H., Bennett, D. R., Ormann, T., & AtKins, R. P. (2003). Manure applications effects on soil and groundwater quality under irrigations in southern Alberta. Alberta Agriculture, Food and Rural Development, Lethbridge, Alberta, Canada.

Perkin- Elmer. (1994). Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry. The Perkin- Elmer Corporation, Norwalk. Connecticut, USA.

Ramírez, J.J., Sotomayor D., Martínez, G., & Pérez, L. (2011). Phosphorus in runoff from two highly weathered soils of the tropics. Can. *Journal Soil Science*. 91, 267-277. Doi:10.4141/CJSS10064.

Red de acción en plaguicidas y sus alternativas para América Latina [Rap-al]. (2010). Eutrofización y contaminación del agua: impactos del modelo de agricultura industrial. http://www.rapaluruguay.org/.

Ruiz, T. M., Sotomayor, D., Torres, C., & Martínez, G. A. (2016). Phosphorus mass cycling and balance in dairy farms: Case studies in Puerto Rico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 220, 115-124. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.003.

SAS. (2009). *SAS User Guide*. Statistical Analysis Institute Inc. Cary N.C

Sheffield, R., Brown, B., Chachine, M., Marti, M de H., & Falen, C. (2008). Mitigatin High – Phosphorus soils. University of Idaho. EE. UU.

Sotomayor, D., Martínez, G., Mylavarapu, R., Santana, O., & Guzmán, J. (2004). Phosphorus soil test for environmental assessment in suptropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35, 1485-1503. Doi: 10.1081/CSS-120038550.

Sparks, D.L. (2007). Methods of soil Analysis part 3. Chemical methods SSA Book series No. 5.

Thomas, B.W., Hao, X., & Larney, F. J. (2017). Non-Legume Cover Crops Can Increase

Non-Growing Season Nitrous Oxide Emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 189–199. doi:10.2136/sssaj2016.08.0269

Varghesen, G., Barker, T., & Saari, E. (1987). Triticale. CIMMYT Institutional Multimedia Publications Repository. http://repository.cimmyt.org/

Weil, R., White, C., & Lawley, Y. (2009). Forage Radish: New Multi-Purpose Cover Crop for the Mid-Atlantic. Department of Environmental Science and Technology College of Agriculture and Natural Resources University of Maryland, College Park.

Weil, R., & Kremen, A. (2007). Perspective thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 87, 551–557.

White, C.H., & Weil, R.R. (2009). Forage radish and cereal rye cover crop effects on mycorrhizal fungus colonization of maize roots. *Plant Soil*. DOI 10.1007/s11104-009-0131-x

White, C.H., & Wheil, R.R. (2011). Forage Radish Cover Crops Increase Soil Test Phosphorus Surrounding Radish Taproot Holes. *Soil Science Society of America Journal*. 75, 121-130. doi:10.2136/sssaj2010.0095