

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA



TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE
MASTER EN AGRICULTURA SOSTENIBLE
MENCIÓN FITOTECNIA

**Determinación de la materia orgánica del suelo mediante
espectroscopia de reflectancia vis-NIR en áreas cultivadas
con boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam)**

Autora: Ing. Diana González Aguiar

Tutor: Dr. C. Ahmed Chacón Iznaga

Santa Clara, 2018



Agradecimientos

Agradecimientos

- *Le doy gracias a Dios por haberme regalado una hija y unos padres tan maravillosos y por brindarme la oportunidad de culminar esta tesis, que contribuirá a mi superación como profesional en el área de conocimientos de la Agronomía e Ingeniería agrícola.*
- *A mi tutor, profesor y amigo Dr. C. Ahmed Chacón Iznaga, por brindarme su amistad y ayuda incondicional desde mi etapa como estudiante de la carrera de Agronomía y actualmente como profesional.*
- *A Oralia, Sirley, Ariany, Alianny, integrantes del grupo de suelos y biofertilizantes del Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP), por sus valiosas contribuciones y su orientación durante el desarrollo de esta investigación.*
- *A mis compañeros del departamento de Ingeniería agrícola que comparten conmigo momentos especiales de trabajo y otras actividades.*
- *Una vez más, gracias a todos.*



Dedicatoria



Dedicatoria

- *A mi hija Karoly María, a la cual quiero con una intensidad que no se puede medir, con unas fuerzas imposibles de describir y con un amor que no me cabe dentro del corazón.*
- *A mi papá Lázaro González López por haber sido mi padre, mi amigo, mi faro y guía con amor y dedicación a través de estos años de mi vida.*



Pensamiento



Pensamiento

“Que nuestros esfuerzos desafíen las imposibilidades... recordar que las grandes proezas de la Historia fueron conquistas de lo que parecía imposible”.

Charles Chaplin.



Resumen



RESUMEN

Con el objetivo de determinar el contenido de materia orgánica del suelo con el uso de la técnica de espectroscopia de reflectancia en el visible e infrarrojo cercano (vis-NIR) en áreas cultivadas con boniato, se realizó un muestreo de suelos entre enero y marzo de 2016. Las muestras fueron colectadas en el paisaje edáfico y en dos campos específicos de la de la empresa agropecuaria “Valle del Yabú”. Se analizó el contenido de materia orgánica por un método convencional y mediante la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR en el rango de longitud de onda de 379 - 1700 nm. Se evaluó la variabilidad espacial y se desarrollaron modelos de calibración y validación mediante la técnica estadística multivariable de regresión por *mínimos cuadrados parciales* (PLSR). La precisión del modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación R^2 . La materia orgánica mostró una variabilidad espacial de baja a moderada en el paisaje edáfico y en los campos específicos de Conyedo y Albarrán. El modelo de calibración obtenido en el paisaje edáfico se evaluó de muy bien con un coeficiente R^2 de 0,95. Se validó este modelo en los campos específicos y se obtuvo una precisión de bien y muy bien con R^2 de 0,89 a 0,90. Los mapas desarrollados con los valores convencionales y estimados por espectroscopia vis-NIR mostraron similitudes. Al campo específico de Albarrán correspondió la menor variabilidad espacial y se obtuvieron los máximos valores del rendimiento agrícola real y estimado con 6,15 y 6,06 t ha⁻¹ respectivamente.



Abstract

ABSTRACT

In order to determine the soil organic matter content with the use of the visible and near infrared (vis-NIR) reflectance spectroscopy technique in areas cultivated with sweet potato, soil sampling was carried out between January and March 2016. The samples were collected in the edaphic landscape and in two specific fields of the agricultural company "Valle del Yabú". The soil organic matter content was analysed by means of a conventional method and vis-NIR reflectance spectroscopy technique in the wavelength range of 379 - 1700 nm. Soil spatial variability was evaluated and calibration and validation models were developed using the multivariate statistical technique of partial least squares regression (PLSR). The model accuracy was assessed by the coefficient of determination R^2 . The organic matter showed a low to moderate spatial variability in the landscape and in the specific fields of Conyedo and Albarrán. The calibration model obtained in the landscape was evaluated as Successful with R^2 of 0.95. This model was validated in the specific fields and an accuracy of Moderately Successful and Successful with R^2 from 0.89 to 0.90 was obtained. The maps developed with the conventional values and estimated by vis-NIR spectroscopy showed similarities. The smallest spatial variability and the maximum values for real yield (6.15 t ha^{-1}) and estimated yield (6.06 t ha^{-1}) corresponded to the specific field of Albarrán.



Índice

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Generalidades de la fertilidad del suelo	3
2.2. Materia orgánica del suelo.....	5
2.2.1. Función e importancia de la materia orgánica en el suelo	7
2.2.2. Pérdida de materia orgánica en el suelo.....	8
2.3. Métodos químicos para determinar la materia orgánica en el suelo.....	9
2.4. Técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR.....	10
2.4.1. Empleo de técnicas espectroscópicas vis-NIR en análisis de suelo.....	11
2.5. Métodos estadísticos para el análisis y desarrollo de modelos vis-NIR	12
2.6. Aspectos generales del cultivo de boniato	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. Área de estudio y colecta de muestras de suelo.....	15
3.2. Análisis espectral de las muestras de suelo	17
3.2.1. Proceso de obtención de los datos espectrales	19
3.3. Análisis químico convencional	20
3.4. Análisis de la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo.....	21
3.5. Desarrollo de modelos de calibración y validación.....	21
3.6. Creación de mapas de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo	22
3.7. Correlación entre la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo y el rendimiento del cultivo de boniato	22
3.8. Procesamiento de los datos.....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Análisis cualitativo de las curvas de reflectancia espectral	25
4.2. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo	28

4.2.1. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico.....	28
4.2.2. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en campos específicos	34
4.3. Modelos de calibración y validación de la materia orgánica del suelo.....	39
4.4. Mapas de la distribución espacial de la materia orgánica del suelo	44
4.5. Correlación entre la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo y el rendimiento del cultivo de boniato	47
4.5.1. Materia orgánica del suelo y componentes del rendimiento agrícola	47
4.5.2. Materia orgánica del suelo y rendimiento agrícola	49
5. CONCLUSIONES	53
6. RECOMENDACIONES	54
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
8. ANEXOS.....



Introducción

1. INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo es determinante en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos como el boniato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam). Este cultivo, de gran importancia económica para el país, requiere suelos ricos en materia orgánica, con buen drenaje y aireación. En Cuba, los suelos de las unidades de producción de cultivos varios con el transcurso de los años han sido influenciados por prácticas agrícolas como el monocultivo, la no incorporación de residuos de cosechas, el uso de fertilizantes minerales para compensar el aporte de nutrientes, el uso inadecuado de la maquinaria agrícola que incide directamente en la compactación e invierte el prisma del suelo y el riego excesivo en suelos con pendientes; han producido una fuerte declinación de sus niveles en el suelo. De acuerdo con Davis (1986) tales prácticas requieren la cuantificación de la variabilidad espacial del suelo en todo el campo.

Se requiere evaluar y comprender la variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos y los rendimientos de los cultivos en un campo para determinar con precisión las mejores prácticas y enmiendas de gestión del suelo para mejorar la cantidad y calidad de los cultivos a la vez que son ambientalmente sostenibles (Awe *et al.* 2015, Aranyos *et al.*, 2016; Gajda *et al.*, 2016). Por lo anterior cada vez es más necesaria la utilización conjunta de técnicas de análisis que sean capaces de determinar los patrones de variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los cultivos, requiriendo el menor número posible de muestras. Además, los métodos convencionales utilizados en la determinación del contenido de materia orgánica del suelo en áreas cultivables, están sujetos a la percepción subjetiva que da lugar a inconsistencia de los resultados, consumen mucho tiempo, esfuerzo y son costosos.

La espectroscopia en el visible (vis) e infrarrojo cercano (NIR), tiene un gran potencial para estimar simultáneamente propiedades del suelo y es una técnica analítica rápida, económica, cuantitativa y ecológica (Gomez *et al.*, 2008; Stevens *et al.*, 2010; Sarkhot *et al.*, 2011). Esta técnica puede ponerse en función de determinar con precisión el nivel de materia orgánica existente en el suelo, en un corto tiempo, con bajo costo, con menos recursos y de forma más eficiente (Stenberg *et al.*, 2010; Conforti *et al.*, 2015;

Shi *et al.*, 2015). La aplicación de tecnologías no destructivas, más rápidas y efectivas como la espectroscopia vis-NIR, resulta imprescindible para recopilar con precisión la información necesaria que permita desarrollar modelos de predicción de estos parámetros. La presente investigación propone como problema científico,

¿Cómo determinar el contenido de materia orgánica del suelo con el uso de la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR y su incidencia en el rendimiento del cultivo de boniato?

Para darle cumplimiento al problema se propone como hipótesis,

El uso de la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR, permitirá la determinación precisa del contenido de materia orgánica del suelo y su relación con el rendimiento del boniato.

Objetivo general

Determinar el contenido de materia orgánica del suelo con el uso de la técnica de espectroscopia de reflectancia en el visible e infrarrojo cercano (vis-NIR) en áreas cultivadas con boniato.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la respuesta de reflectancia espectral vis-NIR en diferentes longitudes de onda y la variabilidad espacial del porcentaje de materia orgánica del suelo en áreas agrícolas cultivadas con boniato.
2. Evaluar la precisión de un modelo de calibración vis-NIR obtenido a partir de muestras de suelo de diferentes áreas agrícolas, cuando se valida con las colectadas en campo específicos.
3. Crear mapas de la variabilidad espacial con los valores de materia orgánica del suelo medidos por el método convencional, y estimados mediante espectroscopia vis-NIR.
4. Correlacionar la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo y el rendimiento agrícola real y el estimado en el cultivo de boniato con la aplicación de la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR.



*Revisión
bibliográfica*

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades de la fertilidad del suelo

Existen muchos conceptos de suelo dependiendo del ángulo y enfoque que se le da al mismo. Sin embargo, se ha generalizado que el suelo es un ente natural, tridimensional, trifásico, dinámico, sobre el cual crecen y se desarrollan la mayoría de las plantas. Lo anterior se debe a que tiene vida; es visto a lo largo, ancho y profundidad; existe una fase sólida, líquida y gaseosa, además dentro del mismo ocurren procesos que involucran cambios físicos y reacciones químicas constantemente. En resumen es el medio natural donde crecen las plantas, por tanto sirve como soporte (Morón *et al.*, 1996).

El suelo está constituido por partículas minerales y materia orgánica (fase sólida), agua con elementos en disolución (líquida), aire, fundamentalmente O₂ y CO₂ (gaseosa). Báscones (2010) plantea que el suelo proporciona un anclaje mecánico a las plantas donde se almacena el agua y el oxígeno que absorben las raíces, además de los elementos necesarios para su nutrición y una extensa población microbiana y de pequeños invertebrados cuya actividad afecta a las propiedades físicas y químicas del suelo. En su composición posee cuatro componentes principales: la fracción mineral, la fracción orgánica, aire y agua. La fracción mineral está formada por partículas de arena, limo y arcilla, la textura básica del suelo. El agua del suelo contiene minerales disueltos y es la principal fuente de agua y nutrientes para los vegetales. El aire del suelo es necesario para que las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo tengan oxígeno.

Según Cubilla (2014), una de sus características principales es la fertilidad, cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo; que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Igualmente, la fertilidad del suelo no es suficiente para el crecimiento de las plantas; el clima juega un papel importante y determinante en muchos casos. Por ejemplo se puede tener un suelo fértil, y que dadas

las temperaturas extremas no es capaz de producir buenas cosechas, entonces en un suelo fértil no productivo. El manejo de la fertilidad del suelo está basado en la adopción de prácticas que permitan potenciar y estimular la diversidad edáfica, un suministro equilibrado de nutrientes para evitar carencias y bloqueos, prácticas de manejo para mejorar la eficiencia de la dinámica del agua evitando su déficit y evitando la posible acumulación de sales y técnicas de gestión de la materia orgánica (Gonzales *et al.*, 2011).

Labrador (2008) refiere que existen una serie de recomendaciones generales para optimizar el manejo de la fertilidad del suelo. Entre estas se encuentran la prioridad de adecuar el sistema de cultivo elegido de acuerdo a la capacidad agroecológica de producción del suelo; los aportes de materia orgánica en forma de estiércol, compost, restos de cosecha, abonos verdes, tienen una función insustituible sobre todos los aspectos ligados a la vida microbiana y la salud vegetal; la disminución de la cantidad de abonos minerales, adecuando su aporte a las carencias que pueda presentar el abono orgánico, a estados de reconversión y a períodos críticos de desequilibrio, deficiencias o mayores necesidades del cultivo; la utilización de abonos verdes que mejoran la actividad metabólica microbiana por el aporte de materiales ricos en azúcares y en nitrógeno y actúan sobre la movilización biológica de determinados nutrientes difícilmente alcanzables por la mayor parte de los cultivos y además actúan sobre la agregación del suelo; el aumento de la diversidad en el aporte orgánico. Una mayor variedad en el aporte de materiales orgánicos, como estiércoles, compost, restos de cosechas y una mayor variedad en el manejo de la diversidad vegetal y la conservación del paisaje agrícola, que lleva consigo además de las anteriores, al aumento de la diversificación de los microclimas locales, la mejora y conservación del agua, el mantenimiento de una gran diversidad de hábitat y especies.

De lo anterior se deriva que estas características no actúan independientes, sino en armónica interrelación, que en conjunto determinan la fertilidad del suelo. Por ejemplo, un suelo puede estar provisto de suficientes elementos minerales –fertilidad química– pero no estar provisto de buenas condiciones físicas y viceversa.

2.2. Materia orgánica del suelo

La fracción orgánica (materia orgánica) incluye vegetales y animales en varios estados de descomposición (Docampo, 2011). De forma general, todos los suelos contienen materia orgánica derivada directamente de los residuos de plantas y animales, la cual es sintetizada durante la descomposición biológica de estos. Un importante paso en la comprensión de la dinámica de la materia orgánica fue reconocer que solo una pequeña parte del total del carbono orgánico y nitrógeno presente en el suelo es biológicamente activo. De esta forma, se ha definido que la materia orgánica del suelo tiene dos componentes: uno descomponible y que genera la fertilidad del suelo y uno difícilmente descomponible que influyen las características coloidales y comportamiento químico de éste (Monic, 2003).

Según Vásquez-Proaño (2008), la materia orgánica del suelo son todos los compuestos orgánicos, vivos o muertos que se encuentren en él. La materia orgánica viva comprende las raíces, macro-organismos o fauna y los microorganismos. La materia orgánica muerta es clasificada en: a) fracción liviana, compuesta por residuos en descomposición con un tamaño mayor a 250 μm y con una densidad menor a 1,6 – 2,0 g/cm^3 , y b) una fracción pesada producto de agregados órgano-minerales con densidades mayores. De esta forma, la materia orgánica de los suelos es muy heterogénea y su permanencia en el suelo es muy variable, pues presenta tiempos de reciclaje que van desde horas a siglos.

La mayor parte de la materia orgánica del suelo tiene origen vegetal y proviene de la vegetación herbácea espontánea de los bosques y de los restos de las cosechas; es la principal fuente de nitrógeno y azufre para las plantas, a veces también de fósforo, tal es así que generalmente más del 95% del nitrógeno total del suelo se encuentra en la materia orgánica del mismo (Morales, 2003).

Su influencia es decisiva en las propiedades físicas como la estructura (granulación) del suelo y la capacidad de retención de la humedad. Las plantas superiores influyen en la formación del suelo, tanto durante el periodo de crecimiento y desarrollo como

después de muertas, cuando sus residuos aéreos y radicales caen en la superficie o quedan formando parte del espesor del suelo (Morales, 2003).

La materia orgánica (residuos de plantas y materiales animales) está hecha de compuestos tales como los carbohidratos, ligninas y proteínas. Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus. Durante el proceso de descomposición los microbios pueden atrapar nitrógeno del suelo. La cantidad de materia orgánica del suelo depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje del mismo y de su laboreo. Los suelos minerales con mayor contenido de materia orgánica son normalmente los suelos de praderas vírgenes. Los suelos de bosques y aquellos de climas cálidos tienen una menor cantidad de materia orgánica (Samaniego-Placencia, 2012).

La materia orgánica se transforma poco a poco dando lugar, por una parte, a elementos minerales solubles o gaseosos tales como, NH_3 , NO_3H , CO_2 en un proceso llamado mineralización o biodegradación; otra parte de esta descomposición, origina complejos coloidales (complejos húmicos) que establecen relaciones físico-químicas con la materia mineral y que de esta manera se vuelven estables y resistentes a la acción microbiana en un proceso denominado humificación. Estos compuestos húmicos a su vez pueden mineralizarse en un proceso más lento. La mineralización se realiza en dos etapas, amonificación con producción de NH_3 (N orgánico - N mineral) y posteriormente, a oxidaciones, se obtiene nitroso y nítrico. En condiciones desfavorables se corta el proceso en la amonificación (fuerte acidez, anaerobiosis) (Dominguez *et al.*, 2009).

Por otra parte la materia orgánica del suelo se caracteriza por hallarse en continuo proceso de degradación, por lo cual se le considera un componente transitorio del suelo que debe ser repuesto continuamente. Esta materia orgánica raramente sobrepasa el 10% del total del suelo (generalmente oscila entre un 2 a 3%) pero aun así su influencia sobre las propiedades del suelo es de fundamental importancia y obliga a que las técnicas culturales conduzcan a un abastecimiento sistémico de las reservas húmicas (Corbella, 2006).

Según Von Wallis (2013), las cifras más altas de materia orgánica, excluyendo las turbas, corresponden a suelos de hierba, en climas húmedos y las cifras más bajas se encuentran en climas cálidos con escasez de lluvias. Las variaciones en el contenido de materia orgánica en el perfil del suelo son también muy considerables, apreciándose una disminución de esta desde la superficie hacia la profundidad.

2.2.1. Función e importancia de la materia orgánica en el suelo

La importancia que se le reconoce a la materia orgánica deriva de su intervención en procesos como la formación y estabilización de agregados, el ciclo bio-geoquímicos de nutrientes, el pH del suelo y el balance de agua y energía. Así, la materia orgánica tiene un papel importante en la retención de humedad, dado su carácter hidrofóbico e interviene en el transporte de agua y solutos, como la adsorción-desorción de pesticidas (García, 2013).

La materia orgánica desempeña muchas funciones importantes en los suelos, puesto que: se origina de los residuos vegetales; contiene la mayoría de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas; influye en la estructura de los suelos; los organismos presentes en el suelo dependen de ella para su alimentación y contribuyen al mismo tiempo proporcionando una condición física deseable al mezclar; crear túneles en su hábitat y participar en la mineralización (Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

Según Monic (2003), la materia orgánica del suelo es de suma importancia porque actúa como almacén de nutrientes, tales como nitrógeno, fósforo, azufre, boro, zinc, entre otros, además incrementa la capacidad de intercambio iónico, provee energía para actividad de microorganismos que contribuyen a la mineralización, incrementa la capacidad de retención de agua, estabiliza la estructura del suelo y hasta la mejora, reduce los efectos de compactación y amortigua el suelo contra cambios rápidos en acidez, alcalinidad y salinidad.

La materia orgánica favorece la formación de una estructura estable de agregados en el suelo por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia orgánica.

Esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua ya que puede absorber de tres a cinco veces más que su propio peso, lo cual es especialmente importante en el caso de los suelos arenosos. La materia orgánica incrementa la retención de nutrientes disponibles para las plantas debido a su mayor capacidad de intercambio de cationes (García *et al.*, 2010).

2.2.2. Pérdida de materia orgánica en el suelo

El contenido de carbono orgánico del suelo depende principalmente del clima, la textura del suelo, la hidrología, el manejo de las tierras y la vegetación según (Hernández, 2013). La materia orgánica disminuye más rápido a más alta temperatura, de tal forma que, en los climas más calurosos, los suelos suelen tener menos materia orgánica que en los climas más fríos. En general, los suelos de textura fina tienen más materia orgánica que los de textura gruesa y retienen mejor los nutrientes y el agua, por lo que reúnen buenas condiciones para el crecimiento vegetal. Los suelos de textura gruesa se caracterizan por una mejor aireación y la presencia de oxígeno acelera la descomposición de la materia orgánica. Cuanto más húmedo sea un suelo, menos oxígeno hay para los procesos de descomposición de la materia orgánica, que se acumula. El laboreo aumenta el volumen de oxígeno en el suelo e incrementa la temperatura media de éste, lo que estimula la descomposición de la materia orgánica. También se produce pérdida de materia orgánica debido a la erosión, que reduce la capa superficial arable y el humus. En general, los cultivos aportan menos materia orgánica al suelo que la vegetación nativa. Las raíces aportan mucha materia orgánica al suelo. Los cultivos producen más biomasa aérea que las raíces. La producción de materia orgánica en las tierras de labor depende del tipo de manejo de las tierras y, en particular, de si se retiran o dejan los rastrojos.

La pérdida de materia orgánica del suelo reduce la capacidad de infiltración del agua, lo que aumenta la escorrentía y la erosión. La erosión, a su vez, reduce el contenido de materia orgánica al arrastrar la tierra fértil. En condiciones de semi-aridez, esto puede dar lugar incluso a fenómenos de desertificación (Ribó-Herrero, 2005; Ribó-Arnau, 2012).

Gonzales *et al.* (2011), refieren que la disminución del contenido de carbono orgánico del suelo puede limitar la capacidad del suelo para proporcionar nutrientes con vistas a una producción agrícola sostenible, lo que podría desembocar en una disminución de los rendimientos y afectar a la seguridad alimentaria. Menos carbono orgánico significa también menos alimentos para los organismos vivos del suelo y, por ende, una menor biodiversidad del suelo.

2.3. Métodos químicos para determinar la materia orgánica en el suelo

Existen varios métodos para determinar el contenido de materia orgánica en el suelo. Estos son: el método de calcinación, el método de oxidación por peróxido de hidrogeno (agua oxigenada) y el método de Walkley-Black (1934), mediante la oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado. Según Burés (2004) el método de calcinación se determina por el contenido total de materia orgánica que posee el suelo completo o en alguna de sus fracciones. Debe tenerse presente que con este método se obtienen valores más altos en el contenido de materia orgánica del suelo, ya que con él se volatizan todas las formas de carbono orgánico presentes en la muestra.

Burés (2004) explica que el método de oxidación por peróxido de hidrogeno (agua oxigenada) es recomendado para eliminar materia orgánica de muestras de suelos que están siendo sometidos a análisis textural y que presentan dificultades para dispersar debido a que tienen un alto contenido de ella, también es útil si se quiere cuantificar el contenido de materia orgánica en un suelo, en que el contenido de ella sea bajo. En esta determinación debe tenerse mucha precaución al hacer las adiciones del peróxido de hidrógeno, pues la reacción puede ser muy violenta y causar quemaduras al operario, así como pérdida del material de la muestra, invalidándose la determinación.

El método de Walkley-Black está basado en la oxidación del carbono de la materia orgánica del abono orgánico por la acción del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en solución sulfúrica. Es requisito indispensable, para obtener resultados confiables, que en la determinación se utilice exceso de solución de ($K_2Cr_2O_7$) y que el ácido sulfúrico (H_2SO_4) sea concentrado.

La oxidación del carbono es activada por el desprendimiento del calor que se produce al añadir el (H_2SO_4) concentrado sobre la solución de ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), lo cual debe ser aprovechado al máximo porque de ello depende la eficiencia de la reacción oxidación-reducción. Con este método se obtienen valores confiables y correlacionan bien con los obtenidos con otros procedimientos. Este método es de uso universal y es recomendado por la mayoría de los especialistas en el mundo (Arrieche *et al.*, 2010).

2.4. Técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR

La espectroscopia ultravioleta-visible o espectrofotometría ultravioleta visible (UV/VIS) es una espectroscopia de fotones y una espectrofotometría. Utiliza radiación electromagnética (luz) de las regiones visible, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas (Volkan *et al.*, 2010).

La espectroscopia UV-visible se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido y fuerza de una sustancia. Se utiliza de manera general en la determinación cuantitativa de los componentes de soluciones de iones de metales de transición y compuestos orgánicos altamente conjugados (Mouazen *et al.*, 2006).

Utilizado extensivamente en laboratorios de química y bioquímica para determinar pequeñas cantidades de cierta sustancia, como las trazas de metales en aleaciones o la concentración de cierto medicamento que puede llegar a ciertas partes del cuerpo.

El espectrofotómetro vis-NIR está compuesto por una fuente, un detector, y un elemento dispersivo que permite la intensidad a longitudes de onda diferentes para ser grabados y luego procesados. Utiliza la radiación del espectro electromagnético cuya longitud de onda está comprendida entre los 100 y los 800 nm (energía comprendida entre las 286 y 36 Kcal/mol) (Stuart, 2004; Chacón, 2014).

Según Forment y Hanselaer (2010) hay otros instrumentos vis-NIR que son monocromadores individuales y espectrógrafos, que no son capaces de proporcionar una precisión satisfactoria debido al rechazo de la luz. Por lo tanto, se utilizan a menudo monocromadores dobles y el principal inconveniente de un sistema monocromadores de doble análisis son la necesidades del movimiento sincronizado y el enfoque de exploración consume mucho tiempo, esto lo hace poco práctico en el lugar y en el campo de estudio.

2.4.1. Empleo de técnicas espectroscópicas vis-NIR en análisis de suelo

Kuang y Mouazen (2012) Indican que hay un debate sobre el tamaño óptimo de la muestra para así poder construir modelos de calibración con la mayor exactitud posible. vis-NIR es una técnica de medición prometedora disponible para brindar información rápida sobre propiedades física y químicas del suelo, incluyendo la humedad, carbono, nitrógeno, fósforo y calcio.

Ofrece una amplia variedad en línea y en la línea de transmisión y reflexión difusa de ondas diseñadas para la medición de líquidos y sólidos, se utiliza ampliamente en la industria debido a su simplicidad, rapidez, y la necesidad de poco o ninguna preparación de la muestra. Por tanto, vis-NIR está siendo cada vez más considerado como una posible alternativa para complementar o reemplazar los métodos de laboratorio químico convencional, con vistas a su utilización en los análisis de diferentes propiedades de suelo (Bilgili *et al.*, 2010).

La implementación de programas de manejo de nutrientes utilizando tecnologías de sensores potencialmente, promueve el cuidado del medio ambiente, manteniendo la productividad de los cultivos y la rentabilidad (Casal, 2013). Por lo tanto permite avances significativos en el área de alimento de producción con la aplicación de insumos agrícolas, como fertilizantes, semillas, plaguicidas, entre otros, en tasa variable dentro de un campo, de acuerdo con los requisitos o potencial productivo de varios sectores homogéneos (Stenberg *et al.*, 2010).

La mayoría de los trabajos sobre análisis espectrales para la cuantificación de las propiedades del suelo se ha centrado en espectroscopia vis-NIR, un método analítico simple y no destructivo que se puede utilizar para predecir varias propiedades simultáneamente (Chang *et al.*, 2001). El espectro recoge tanto la información química como la física lo que nos permite determinar el contenido de materia orgánica.

2.5. Métodos estadísticos para el análisis y desarrollo de modelos vis-NIR

La quimiometría es la disciplina que utiliza métodos matemáticos y estadísticos para la selección de los procedimientos experimentales óptimos y los tratamientos apropiados de los datos en los análisis químicos e incluye tres grupos principales de técnicas compiladas como (I) (pre-tratamiento), donde la reflectancia espectroscópica es pre-procesada (Cécillon y Brun, 2007; Cécillon *et al.*, 2012), (II) métodos de clasificación, son las muestras del grupo de acuerdo con su espectro y (III) métodos de regresión, para relacionar el espectro con algunas propiedades cuantificables de las muestras.

En los espectros de tratamiento previo se utilizan técnicas para eliminar cualquier información irrelevante que no puede ser manejada adecuadamente por las técnicas de modelado (Schirrmann y Domsch, 2011). Por lo tanto, las funciones matemáticas, tiene que ser usado para manipular o eliminar tales interferencias de las señales espectrales primas.

El tratamiento previo más comúnmente usado para las técnicas vis-NIR en el suelo son $\log(1/R)$, los derivados, suavizado, la corrección multiplicativa de dispersión (MSC), normalización, la variante normal estándar (SNV) y Media Center (Ulmschneider y Roggo, 2008).

2.6. Aspectos generales del cultivo de boniato

El cultivo de boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lamb.), es uno de los más importantes para la dieta del pueblo cubano. Es originario de la zona tropical de América, pertenece al grupo de raíces y tubérculos o cultivos tuberosos que son fuentes de carbohidratos, del que se conocen alrededor de 53 cultivares de importancia comercial para el consumo

fresco, animal y agroindustrial (Díaz *et al.*, 2013; Techeira *et al.*, 2014; García *et al.*, 2016).

La producción de boniato en Cuba en la actualidad, se basa fundamentalmente en el cultivar INIVIT B2-2005, el cual ocupa el 50 % de las áreas totales de boniato del país. El ciclo vegetativo es corto, de tres a seis meses según el cultivar. En el año 2014 los rendimientos del boniato fueron de 8,2 t ha⁻¹ como promedio nacional para un producción de 412 000 t en un área de 50 000 ha. Sin embargo, el potencial de dichos cultivares oscila entre las 40 a 50 t ha⁻¹. Diferentes causas inciden en esta respuesta sobre todo la carencia de irrigación y fertilizantes como aspectos objetivos pero los aspectos subjetivos influyen probablemente con más fuerza, como el uso de material de propagación con baja calidad, plantación deficiente; pérdidas por plagas y una inadecuada cosecha ya que dejan de cosecharse hasta el 30 % de las raíces tuberosas producidas (Abarca y Bernabé, 2010; Olivet-Rodríguez *et al.*, 2012; MINAG, 2015), por lo que es necesario continuar las investigaciones y evaluaciones agronómicas correspondientes.

Este cultivo se adapta a diferentes zonas donde predominen los suelos sueltos, porosos y con buen drenaje (Abarca y Bernabé, 2010; Olivet-Rodríguez *et al.*, 2012). Sin embargo, si la pendiente del terreno es muy pronunciada, mayor de 4,1 % ocasiona que disminuya la producción. Por lo anterior, cuando se evalúa la aptitud agrícola de un área y la necesidad de introducir prácticas específicas de manejo y recuperación de suelos, se deben observar los aspectos relacionados con la topografía, la cual se caracteriza por los ángulos de las pendientes y por la longitud y forma de las mismas. La pendiente tiene una relación muy estrecha con la retención y captación de agua, además de la profundidad del suelo y acceso de maquinaria.



*Materiales y
 métodos*

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio y colecta de muestras de suelo

La investigación se desarrolló en la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú, situada en la periferia norte del municipio Santa Clara, provincia Villa Clara, en la carretera a Sagüa la Grande, kilómetro 4 ½. Esta unidad tiene como tarea fundamental la producción de cultivos varios. Se seleccionaron áreas agrícolas cultivadas con boniato (*I. batatas* (L.) Lam. cv. INIVIT B- 2005), sobre un suelo Pardo mullido medianamente lavado, según la versión de clasificación de los suelos de Cuba de Hernández *et al.* (2015). En este cultivo se obtienen rendimientos muy bajos a nivel nacional, aun cuando es uno de los más consumidos, por lo que es necesario analizar aquellos factores que puedan incidir en estos resultados. Las muestras de suelo se colectaron en la unidad básica de producción cooperativa UBPC-3 Jesús Menéndez, y en las unidades estatales de base UEB Albarrán, UEB Pirey, UEB Pararrayo (Figura 1).

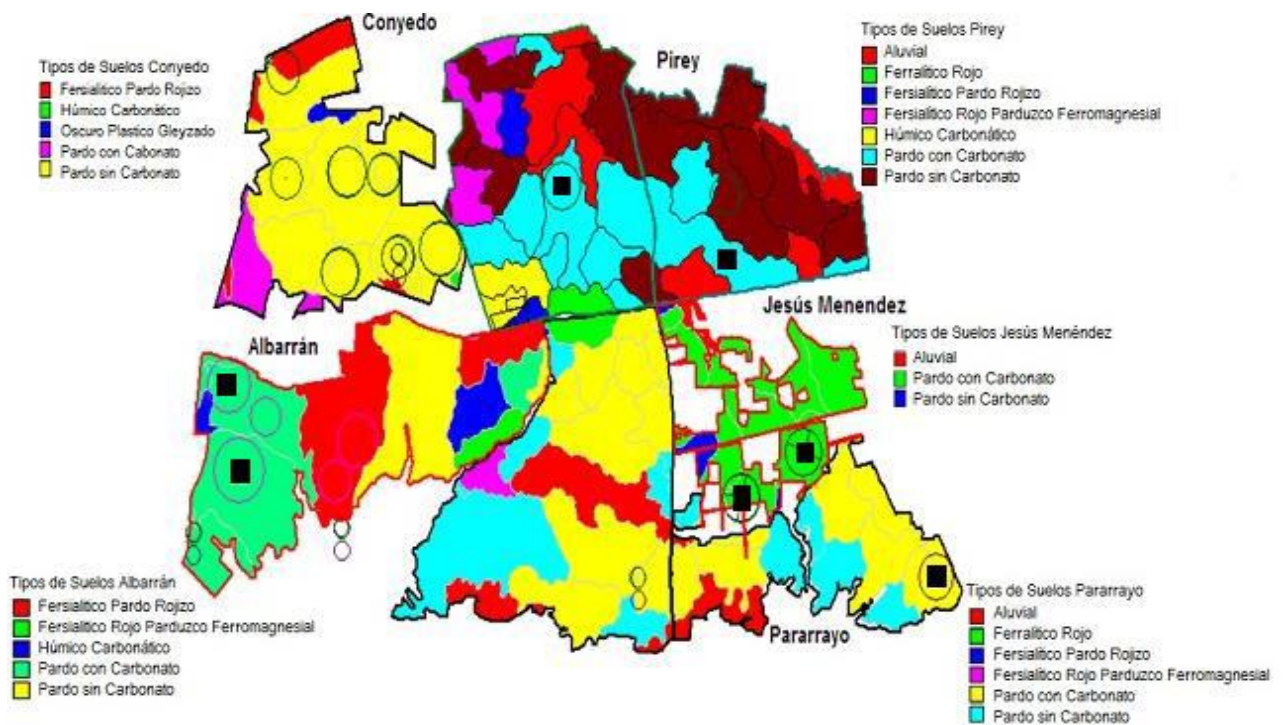


Figura 1. Distribución de las áreas agrícolas y los tipos de suelo en la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú

Estas muestras de suelo fueron colectadas en el año 2016 en dos niveles:

1. Diferentes áreas agrícolas (paisaje edáfico).
2. Dos campos específicos.

Las dimensiones de las diferentes áreas agrícolas que forman parte del paisaje edáfico, estaban en el rango de 0,86 a 1,85 ha. Se colectaron un total de 72 muestras de suelo en la UBPC-3 Jesús Menéndez y en las UEB de Pararrayo, Albarrán y Pirey (Tabla 1).

Tabla 1. Muestras de suelo utilizadas en el set de calibración

Área agrícola	Dimensiones (ha)	No. muestras
Pararrayo	0,86	9
UBPC-3	1,64	18
Albarrán	1,72	21
Pirey	1,85	24
Total	6,07	72

Para este nivel se empleó una barrena agroquímica, trazando una diagonal imaginaria que comienza y termina a 10 m de los bordes de cada área muestreada. Se tomaron 30 submuestras de la capa arable (0 - 20 cm) y con las mismas se conformó una muestra compuesta de 1 kg de suelo, hasta completar el número para cada una de estas áreas (Figura 12a, Anexos).

Adicionalmente, en la misma profundidad de 0 - 20 cm, se tomaron 24 muestras de suelo en dos campos específicos, pertenecientes a la zona agrícola de Conyedo¹ y a la UEB Albarrán con un área de 0,72 y 0,80 ha respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Muestras de suelo utilizadas en el set de validación

Área agrícola	Dimensiones (ha)	No. muestras
Conyedo	0,72	24
Albarrán	0,80	24

¹ Desde el punto de vista administrativo la zona agrícola de Conyedo actualmente pertenece a la UEB Albarrán.

Se utilizó un esquema de muestreo aleatorio estratificado. Los campos se dividieron en cuatro cuadrantes (estratos) de los cuales cada muestra de suelo se seleccionó por separado y al azar. Cada cuadrante se muestreó en proporción al total, con seis muestras cada uno (Figura 12b, Anexos). Todas las muestras de suelo fueron envasadas en bolsas de nylon con capacidad de 1 kg, que se etiquetaron y se trasladaron hacia el cuarto de muestras del laboratorio de suelos y biofertilizantes, perteneciente al Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP), de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV).

3.2. Análisis espectral de las muestras de suelo

Se realizó el análisis espectral de las muestras de suelo utilizando un espectrofotómetro portátil CORONA *plus* vis-NIR, constituido por una red de diodos y un cabezal de medición OMK500-H conectado a un haz de fibra óptica. Este cabezal está diseñado para medir la dispersión en muestras relativamente heterogéneas, por lo que resulta adecuado para la medición *on-line* de la reflectancia difusa de muestras de suelo, donde puede variarse la distancia entre el cabezal de medición y la superficie de la muestra (Figura 2).



**Figura 2. Espectrofotómetro vis-NIR portátil (CORONA
Plus vis-NIR Zeiss, Jena, Alemania)**

Este cabezal de medición dispone de una lámpara de halógeno de 10W, conectada a una fuente de alimentación de 5V. Un sistema proporciona la iluminación óptica de la muestra a 0° en un haz casi paralelo. En el cabezal de medición del color se disponen de manera uniforme 15 fibras ópticas individuales en un anillo para la observación de la muestra a 45°. Las fibras se encuentran agrupadas a una guía de luz conectada al espectrofotómetro. La conexión de esta guía al canal de medición se encuentra en la parte frontal del instrumento. La computadora (PC) se conecta al espectrofotómetro a través de una interfaz *Etherne*. La configuración se determina mediante el software *Aspect-plus* (proporcionado por Carl Zeiss Jena). Las operaciones no requieren de otro dispositivo, ya que el control se maneja a través del software en la PC (Tabla 3).

Tabla 3. Datos técnicos del cabezal de medición OMK 500-H-NIR

Componentes	Propiedades
Rango espectral	270 ... 1701,9 nm
Tiempo de medición de la muestra	< 2 s
Rango de la medida	378,87-1701,9 nm
% de ruido	$\Delta R < 0.04 \% R$
Sensibilidad variante a la distancia	$X \pm 1 \text{ mm } dR < 0.2 \%$
Tiempo de la integración para la desviación de la balanza llena	< 100 ms
Fuente ligera	lámpara de halógeno 5 V, 10 W, estabilizada
Vida de lámpara	≈3 000 horas
Conector de fibra	2x Zeiss-conector
Vista geométrica	15 x 24° circular bajo 45°
ángulo iluminando	0°
Tamaño de la mancha	≈20 mm
La longitud de fibra óptica	1 m ... 10 m
Peso	1,3 kg
Dimensiones	100 mm x 100 mm x 197 mm (Lx A x H)
Protección adjunta	IP 55

3.2.1. Proceso de obtención de los datos espectrales

Se realizó el diagnóstico del equipo, mediante la evaluación de los *test* de hardware y de software, una vez aprobados se procedió a la lectura espectral de cada una de las muestras de suelo. Las 72 muestras de suelo colectadas en diferentes áreas agrícolas (paisaje edáfico) se incluyeron en un *set* para el desarrollo del modelo de calibración y las 24 muestras de suelo tomadas en cada campo específico se emplearon para conformar dos *sets* independientes para la validación de ese modelo matemático. Los espectros de reflectancia fueron adquiridos en el laboratorio para todas las muestras de suelo colectadas, utilizando los mismos ajustes en el equipo: rango de longitud de onda de 379 - 1700 nm y tiempos de integración de 143,5 ms (*vis*) y 200 ms (NIR). La configuración mínima se determinó mediante el software *Aspect-plus*.

Se colocó una cantidad aproximada de 12 g de las muestras de suelo en una placa *Petri* de 10 mm de profundidad y 35 mm de diámetro. El suelo en la placa *Petri* primero se comprimió y luego se estabilizó cuidadosamente para obtener una superficie lisa, a fin de reducir la variación que puede producir esta compresión del suelo (Figura 3).



Figura 3. Placa *Petri* con la muestra de suelo comprimida y con una superficie lisa

Esta placa se colocó debajo del sensor en el centro del punto de coordinación. En la zona central de la placa *Petri*, se tomaron tres espectros de reflectancia con una rotación de la muestra aproximadamente de 120° entre las adquisiciones espectrales

posteriores. Los tres espectros de cada muestra de suelo se promediaron para obtener un espectro por muestra.

Cada espectro se guardó como archivo individual (.csv), se dispuso en una matriz simple y se importaron al software MATLAB 7.9 (R2009b, *The Mathworks, Natick, MT*), el cual es una herramienta integral de análisis de datos para estadística exploratoria, análisis multivariado, clasificación, predicción y diseño de experimentos.

3.3. Análisis químico convencional

Las muestras de suelo se secaron al aire a temperatura ambiente hasta obtener peso constante, se tamizaron con un tamiz de 0,5 mm, se homogeneizaron y se les realizó el análisis químico convencional, con el método de *Walkley-Black* para determinar el porcentaje de materia orgánica.

En este método primero se pesó 1 g de suelo seco, previamente tamizado con un tamiz de 0,5 mm y se depositó en un *erlenmeyer* de 500 ml. Se añadieron 20 ml de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) al 1% y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), para que se produjera la oxidación de la materia orgánica.

Posteriormente se dejó en reposo durante 30 min para que se promoviera la reacción entre $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 . En ese tiempo las muestras están dentro de una campana que recoge los gases tóxicos que desprenden las muestras. Pasado los 30 min, a cada muestra se le adicionaron 200 ml de agua destilada y se dejó en reposo durante 1 hora.

Luego se filtró a través de un papel de filtro y se realizó la lectura de transmitancia en un fotocolorímetro a una longitud de onda de 650 nm. La concentración de materia orgánica (%) se obtuvo con esta lectura de transmitancia de cada una de las muestras y una tabla previamente confeccionada mediante una curva para conocer las diferentes concentraciones (Tabla 14, Anexos).

En la Tabla 4 se resumen los rangos y niveles de materia orgánica de suelo que se utilizaron en esta investigación para evaluar las concentraciones existentes en las áreas agrícolas estudiadas.

Tabla 4. Clasificación de los niveles de materia orgánica de suelo

Materia orgánica (%)	Nivel	Fuente
<1,50	Muy Bajo	
1,50 – 3,00	Bajo	López <i>et al.</i> (1981)
3,10 – 5,00	Mediano	
> 5,00	Alto	

3.4. Análisis de la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo

Para comparar la variabilidad de la materia orgánica a lo largo del paisaje edáfico y dentro de un campo específico, se utilizó el coeficiente de variación (CV). Los resultados se clasificaron en las tres clases que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la variabilidad espacial del suelo

CV (%)	Nivel	Fuente
<25	Baja	
25 – 50	Moderada	Aweto (1982)
50 – 100	Alta	

Leyenda:

CV- coeficiente de variación

3.5. Desarrollo de modelos de calibración y validación

Para el desarrollo de los modelos se aplicó la técnica estadística multivariable de regresión por *mínimos cuadrados parciales* (PLSR). Como método de pre-procesamiento se utilizó la corrección de señal multiplicativa (MSC), 1ra derivada de *Savitzky-Golay*, suavizado medio, centrado medio. La fiabilidad de los modelos se

determinó mediante el coeficiente de determinación R^2 , con el empleo de la escala que se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Categorías de evaluación de la fiabilidad de los modelos

Categoría	R^2	Fuente
Excelente	$R^2 > 0,95$	
Muy bien	$0,90 \leq R^2 \leq 0,95$	Malley <i>et al.</i> (2004)
Bien	$0,80 \leq R^2 < 0,90$	
Regular	$0,70 \leq R^2 < 0,80$	
Menos fiable	$R^2 < 0,70$	Nduwamungu <i>et al.</i> (2009)

3.6. Creación de mapas de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo

Los mapas se desarrollaron mediante un algoritmo de interpolación *kriging* implementado en el software MATLAB 7.9. Los mapas se compararon por medio del coeficiente de variación (CV) de los valores medidos convencionalmente y los estimados por la técnica de espectroscopia vis-NIR. Se utilizó la escala descrita anteriormente y que se muestra en la Tabla 6.

3.7. Correlación entre la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo y el rendimiento del cultivo de boniato

En estas áreas agrícolas el manejo agrotécnico del cultivo de boniato incluyó la fertilización manual en el fondo del surco antes de la plantación, utilizando fórmula completa (9-13-17) a razón de 745 kg ha^{-1} . La plantación se realizó de forma manual, a una distancia de $0,75 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ y con el empleo de esquejes de 25 cm de longitud. Se aplicaron productos fitosanitarios, se empleó el herbicida pre-emergente (Gesapax), se realizaron dos labores de cultivos, dos limpiezas manuales y un aporque antes del cierre del campo. Se regó mediante enrolladores con una frecuencia decenal y en cada riego se aplicó una lámina de 25 mm equivalente a $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 13, Anexos).

Con relación a este cultivo en cada uno de los cuatro cuadrantes en que se dividieron los campos específicos para el análisis de la materia orgánica se determinó,

1) Componentes del rendimiento agrícola:

Número de raíces tuberosas comerciales por planta: se calculó en base al número total de las raíces tuberosas comerciales sobre el número de plantas en el área de cálculo de cada parcela.

Peso por raíz tuberosa comercial: se determinó en base al peso de las raíces tuberosas comerciales² sobre el número de raíces tuberosas comerciales cosechadas en el área de cálculo de cada parcela.

Peso de raíces tuberosas comerciales por planta: se calculó en base al peso de las raíces tuberosas comerciales sobre el número de plantas en el área de cálculo de cada parcela.

2) Rendimiento agrícola:

En los campos específicos se calculó el rendimiento agrícola en cada cuadrante y a partir de estos se determinó el rendimiento agrícola real del campo. A partir de un modelo de regresión lineal $y = ax + b$ entre la materia orgánica del suelo y el rendimiento agrícola de cada cuadrante, se obtuvo el rendimiento estimado en cada campo específico, donde previamente se estimó la materia orgánica del suelo mediante la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR. Se expresó en $t\ ha^{-1}$.

3.8. Procesamiento de los datos

El rango, media, mediana, asimetría, curtosis, mínimo, máximo, desviación estándar, coeficiente de variación y los histogramas de frecuencia, se obtuvieron al procesar los datos con las funciones estadísticas incluidas en el Paquete de herramientas de análisis de Microsoft Excel 2007.

² Se considera comercial una raíz tuberosa a partir de 115 g de peso como establece NCISO 874:03 para la comercialización del boniato en el país (MINAG, 2005).

Se aplicaron técnicas quimiométricas con el empleo del modelo regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para la calibración y validación vis-NIR. Durante los análisis, los valores de varias muestras fueron identificados como atípicos o extraños, que no se ajustan al patrón establecido por otras observaciones y cuya presencia puede alterar los resultados de manera notable. Después del análisis de los espectros, estos se eliminaron del set de datos. La estrategia de cross-validación de persianas venecianas se utilizó en esta investigación para evaluar el error de predicción en función de la complejidad de los modelos.

La fiabilidad de los modelos se evaluó en función de los estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio de la cross-validación (RMSECV) y de la predicción (RMSEP), diferencia porcentual relativa (RPD) y relación del rango de error (RER). La RPD es un estadístico que se calcula dividiendo la desviación estándar (DE) de los datos de referencia utilizados en el set de validación por el error estándar de predicción (SEP):

$$RPD = \frac{DE}{SEP}$$

La RER se calcula dividiendo el rango en los datos de referencia utilizados en la validación establecida por el SEP:

$$RER = \frac{Rango}{SEP}$$

Todos los cálculos se realizaron en MATLAB 7.9 (R2009b, *The Mathworks*, Natick, MT), el cual es una herramienta integral de análisis de datos para estadística exploratoria, análisis multivariado, clasificación, predicción y diseño de experimentos.



Resultados y discusión

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis cualitativo de las curvas de reflectancia espectral

En la Figura 4 se muestra una representación gráfica de la reflectancia espectral de las muestras de suelo, en función del rango de longitud de onda en la región vis-NIR, antes y después de la aplicación del método de pre-procesamiento.

La reflectancia de la luz varió con la longitud de onda en el paisaje edáfico y en cada uno de los campos específicos. El patrón de firmas espectrales del suelo para estas áreas muestreadas fue muy similar, mostrando características generales que se pueden distinguir claramente, lo que sugiere que la identificación del tipo de suelo podría lograrse a través de los espectros de reflectancia.

De acuerdo a lo anterior, la reflectancia espectral se incrementó en la misma medida en que aumentaba la longitud de onda, por lo que en la región visible (379 - 780 nm) la reflectancia fue menor que en la región NIR (780 - 1700 nm). Los máximos valores de reflectancia se observaron en la longitud de onda de 1700 nm en todas las áreas.

Las magnitudes de reflectancia de estas firmas espectrales mostraron que alrededor de la longitud de onda de 1450 nm, los valores de reflectancia disminuyen y, en consecuencia, aumentan nuevamente alrededor de la misma longitud de onda. Este pico de decrecimiento se debe a las bandas de absorción de agua. En coincidencia con este resultado Choudhury *et al.* (2009) reportaron que incluso cuando están secas las muestras de suelo arcilloso contienen bandas de absorción de agua entre los 1400 nm y 1900 nm, dado que estos suelos arcillosos tienen moléculas de agua en su composición química y no todas estas moléculas son eliminadas durante el proceso de secado al aire.

Es importante darse cuenta de que los valores de reflectancia obtenidos son valores relativos y, para muestras no fluorescentes, son independientes de la calidad y cantidad de la luz usada para iluminar la muestra. De esta forma, aunque los factores de reflectancia se midan usando una fuente de luz concreta, es perfectamente correcto calcular los valores colorimétricos para cualquier iluminante conocido.

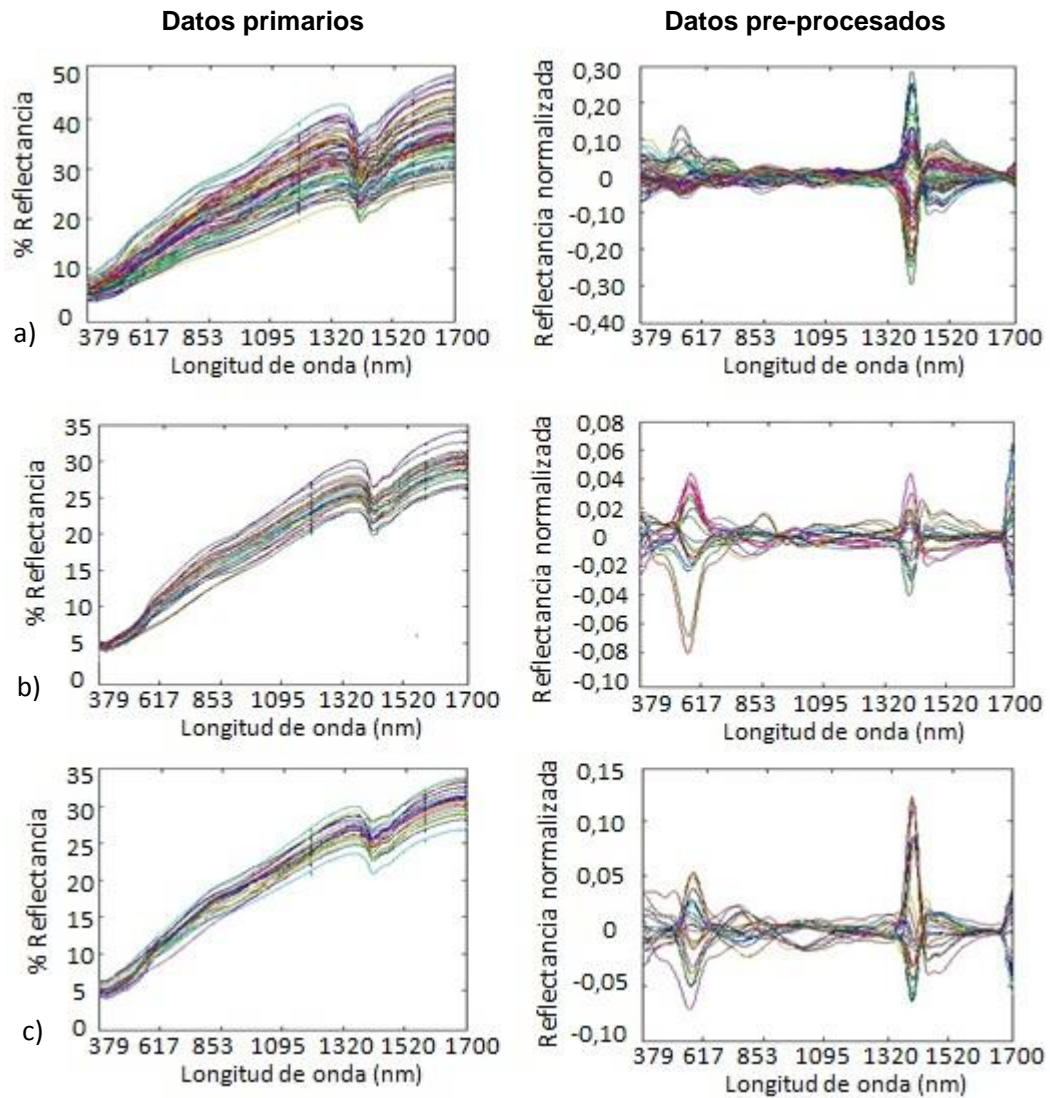


Figura 4. Reflectancia espectral de las muestras de suelo antes y después del pre-procesamiento

**a) paisaje edáfico; b) campo específico de Conyedo;
c) campo específico de Albarrán**

Generalmente, el pre-procesamiento espectral con funciones matemáticas es utilizado para corregir la carencia de linealidad y el ruido electrónico del equipo. Además, se utiliza para eliminar la variabilidad en el espectro que no sea causada por un componente de interés, sino por la dispersión de la luz e interferencias químicas.

En correspondencia con lo reportado por Monsef (2012), las técnicas de reflectancia pueden dividirse en dos categorías: reflexión interna y reflexión externa. En el método de reflexión interna, se estudia la interacción de la radiación electromagnética en la interfaz entre la muestra y un medio con un índice de refracción más alto, mientras técnicas de reflexión externa surgen de la radiación reflejada desde la superficie de muestra. La reflexión externa cubre dos tipos diferentes de reflexión: reflexión especular (regular) y reflexión difusa. La primera se asocia con la reflexión desde superficies lisas como un espejo y la segunda con la reflexión de superficies ásperas.

De acuerdo con Chang *et al.* (2001); Jimaré-Benito *et al.* (2008) y Guillén *et al.* (2010), los espectros de infrarrojo cercano están dominados por sobretonos débiles (transiciones vibracionales desde el estado fundamental a estados excitados superiores) y combinaciones de bandas vibracionales fundamentales de ciertos grupos funcionales, principalmente C-H, N-H y O-H (Figura 14, Anexos). Los espectros están influenciados por la estructura física de los materiales, incluyendo tamaño y forma de partícula, espacio entre ellas, contenido de humedad y presencia de residuos, entre otros factores.

La relación entre incremento del contenido de materia orgánica y la disminución de la reflectancia espectral, se observa en suelos con más de 1,5% de materia orgánica, de esta forma Irons *et al.* (1989) determinaron que un aumento en el contenido de materia orgánica del suelo causa una disminución en la reflectancia en todo el espectro. Un alto contenido de materia orgánica y por consiguiente una fuerte disminución de la reflectancia, incluso podría enmascarar otras características de absorción en el espectro de suelo.

4.2. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo

El suelo es espacialmente heterogéneo y este es uno de los factores que influye en la variabilidad de los rendimientos. El conocimiento de la variabilidad espacial de los parámetros de fertilidad del suelo, es sustancial para la producción agrícola. Reconocer la importancia de cuantificar y manejar esta variabilidad espacial en las áreas agrícolas, contribuiría a poner en práctica diferentes enfoques para la implementación del manejo por sitio-específico en los diferentes sistemas de producción de cultivos.

4.2.1. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico

El paisaje edáfico es un área con un conjunto común de tipos de suelo y atributos de paisaje, que se considera como el ecosistema total con el que se asocia un suelo en particular, con énfasis en el propio suelo. Podría ser utilizado en cualquier nivel de la clasificación del suelo. El análisis de los valores de media, mínimo y máximo y desviación estándar de la concentración de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Media, mínimo, máximo y desviación estándar de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico

Área agrícola	Media	Min	Max	DE	Clasificación
Pararrayo	1,87	1,15	2,66	0,48	Muy bajo - Bajo
UBPC-3	1,86	0,69	2,74	0,59	Muy bajo - Bajo
Albarrán	3,27	2,70	4,59	0,68	Bajo - Mediano
Pirey	1,85	0,86	2,74	0,42	Muy bajo - Bajo

Leyenda:

Materia orgánica en %; **Min-** mínimo valor observado; **Max-** Máximo valor observado;
DE- desviación estándar de los datos de referencia

En todas las áreas se observaron valores de la media entre 1,86 y 1,87%, excepto en el área agrícola de Albarrán con 3,27%. En esta zona también se observaron los valores mínimos y máximos más altos con 2,70% y 4,59% respectivamente. Los valores mínimos más bajos correspondieron a las áreas de la UBPC-3 y del Pirey, que en ambos casos fue inferior al 0,90%. Estos valores de materia orgánica clasifican en el rango de muy bajo a bajo en todas las áreas, excepto en Albarrán que están en el rango de bajo a mediano.

El desarrollo de estos suelos está determinado en gran medida por su posición en el paisaje y su productividad por sus propiedades, que son el resultado de su desarrollo. Muchos paisajes edáficos ocurren en más de una región fisiográfica (Valentine *et al.* 1978; Murphy *et al.*, 2001). Finke y Montanarella (1999), lo definen como una porción de la cobertura del suelo con grupos de suelo que tienen o presentan relaciones funcionales. Los criterios de clasificación incluyen la escala y el arreglo espacial para los criterios morfológicos, los factores de la diferenciación, el grado de la relación.

A su vez, el contenido medio de la materia orgánica está influenciado por los efectos de las prácticas agrícolas que se corresponden con el manejo del suelo en estas áreas. Otro de los factores que afectan el contenido de materia orgánica son las aplicaciones intensivas de plaguicidas y el riego, que se realiza por aspersión mediante enrolladores, o con el uso de máquinas de pivote central en campos con grandes desniveles del terreno, provocando la erosión del suelo y con ello las pérdidas de materia orgánica.

Estos resultados coinciden con lo reportado por López y Espinosa (1995) que refieren que actualmente el manejo basado en la media de la fertilidad ya no es suficiente para mantener rendimientos altos sostenibles en una agricultura empresarial y ni en otro tipo de agricultura de menor intensidad. Es común observar que se sobrefertiliza las áreas de bajo rendimiento y que no usan suficientes nutrimentos en las áreas de alto rendimiento. El continuar con el manejo basándose en la media de la fertilidad solamente incrementa la variabilidad y reduce la productividad de la finca. Cuando estas condiciones se hacen aparentes es necesario iniciarse con manejo por sitio específico.

La cantidad de materia orgánica en estos campos agrícolas es el resultado de la incorporación o la pérdida de la misma, a través de la descomposición. Un equilibrio positivo de materia orgánica es difícil de lograr, esto significa que si se pierden grandes cantidades de materia orgánica resulta difícil restaurar su nivel en el suelo. Incluso en condiciones favorables y con un buen manejo de los cultivos, esto puede tomar varias décadas.

De acuerdo con Veseth (1986), la variabilidad de los parámetros de fertilidad del suelo en los paisajes edáficos afecta la gestión del suelo, el potencial de producción del cultivo y la conservación del suelo y el agua. Por lo tanto, la caracterización de la heterogeneidad espacial en las propiedades químicas en los campos agrícolas es importante para identificar la escala de variación espacial de estos parámetros de fertilidad del suelo.

Por otra parte, Murphy *et al.* (2001) consideraron que el mapeo de los paisajes edáficos a través de la investigación y recopilación de perfiles detallados del suelo y del paisaje y los análisis de los parámetros de fertilidad proporciona una base de datos de recursos naturales importante, sobre la cual tomar decisiones desde el punto de vista ambiental.

Los histogramas son una representación gráfica de la distribución de las muestras de suelo en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Las frecuencias son representadas en el eje vertical mientras que en el eje horizontal se representan los valores de cada una de las variables. Los histogramas de la materia orgánica del suelo a nivel de paisaje edáfico se muestran en la Figura 5. La frecuencia de distribución es bimodal con dos máximos locales en los intervalos de 1,20 a 1,80% y de 2,40 a 3,00%. Estos intervalos contienen, respectivamente, 23 y 22 muestras de suelo, que representan 31,94% y 30,55% del total analizado. Este histograma mostró coeficientes de curtosis y de asimetría positivos con valores de 0,90 y de 0,93 respectivamente.

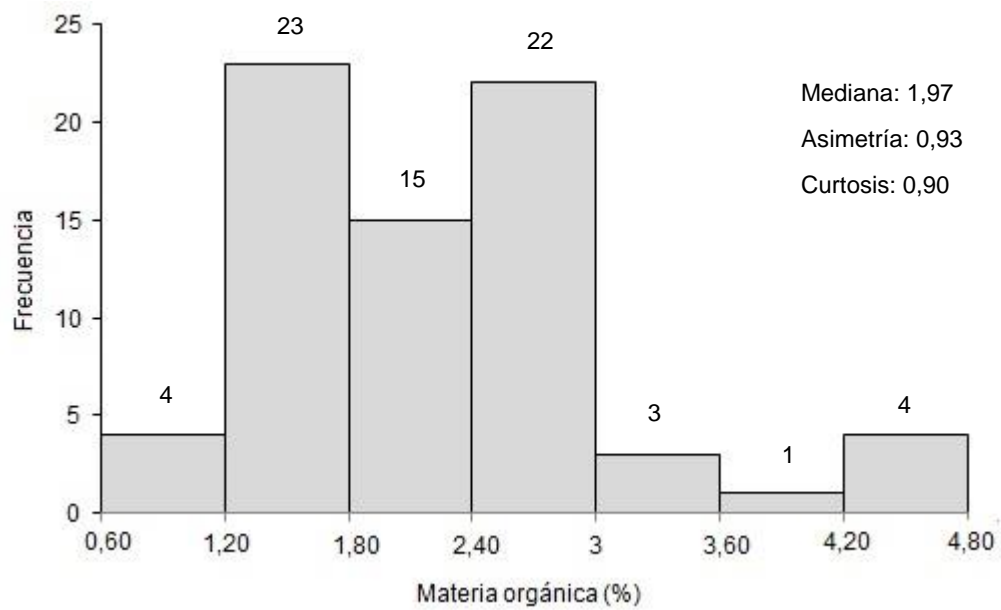


Figura 5. Distribución de la frecuencia de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico

Se observó que a la izquierda del primer máximo absoluto existen valores (4) que representan el 5,55% del total y se clasifican de muy bajos, mientras que los que se ubican a la derecha del mismo (15) constituyen el 20,83% del total de muestras analizadas y sus valores de 1,80 a 2,40% se clasifican como bajos. A la derecha del segundo máximo absoluto se ubican ocho (8) muestras con valores entre 3 y 4,80% que se clasifican como medianos y representan el 11,11% del total.

Los coeficientes de variabilidad espacial (CV) para las áreas muestreadas en el paisaje edáfico se muestran en la Tabla 7. Los mayores coeficientes de variación (CV) se observaron en la UBPC-3 (30,55%) y en Pararrayo (25,66%). Desde los límites de CV utilizados en esta investigación, ambos parámetros tuvieron una variabilidad moderada ($25 < CV < 50\%$). Por otro lado, el CV más bajo se obtuvo en Albarrán (20,65%) que al igual que las áreas del Pirey indica una baja variabilidad para este parámetro de fertilidad del suelo.

Tabla 7. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en el paisaje edáfico

Área agrícola	CV (%)	Clasificación
Pararrayo	25,66	Moderada
UBPC-3	30,55	Moderada
Albarrán	20,65	Baja
Pirey	22,52	Baja

La variabilidad clasificada como moderada se debió probablemente a las prácticas de manejo de fertilizantes aplicadas a estas áreas. Estos resultados pudieran ser una motivación para incrementar el nivel de investigaciones relacionadas con el grado de variabilidad espacial de la materia orgánica en este paisaje edáfico. Lo anterior coincide con lo reportado por Guimarães – Couto *et al.* (1997).

Generalmente, las recomendaciones para la fertilización del cultivo, se realizan para tipos de suelo y sistemas de manejo promedios, y de esta forma se aplican los fertilizantes a través del paisaje edáfico. Por tanto, es importante tener en cuenta la tecnología de aplicación de dosis variable, como un método que contribuya a realizar una distribución más uniforme del fertilizante, aplicando a cada zona lo que necesite y de esta forma puede evitarse el exceso o déficit en la aplicación.

De acuerdo con Corwin *et al.* (2003) la variabilidad espacial influye en la medida y el número de muestras de suelos necesarias para caracterizar los parámetros de fertilidad del suelo de una área de interés. Sobre los aspectos más críticos del análisis de suelo, Adamchuk *et al.* (2004) enfatizan en la obtención de muestras representativas, colectadas a una distancia espacial apropiada, con una profundidad adecuada y durante una época conveniente.

4.2.2. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en campos específicos

En la Tabla 8 se muestran los estadísticos descriptivos de la concentración de materia orgánica de las muestras de suelo colectadas en dos campos específicos pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú. En ambos campos se observaron valores de la media de 2,87 y 2,91% para Conyedo y Albarrán respectivamente. En el área de Albarrán se observaron los valores mínimos más altos con 2,62%, mientras que los máximos más elevados correspondieron a Conyedo. Para ambos campos específicos estos valores de materia orgánica clasifican en el rango de bajo a mediano.

Tabla 8. Media, mínimo, máximo y desviación estándar de la materia orgánica del suelo en campos específicos

Campos específicos	Media	Min	Max	DE	Clasificación
Conyedo	2,87	2,08	3,55	0,48	Bajo - Mediano
Albarrán	2,91	2,62	3,44	0,59	Bajo - Mediano

Leyenda:

MO en %; **Min**- mínimo valor observado; **Max**- Máximo valor observado;
DE- desviación estándar de los datos de referencia

En base a estos resultados, diferentes autores han reportado que el aprovechamiento de los residuos orgánicos en la agricultura es cada día una gran necesidad para garantizar cosechas rentables sin la utilización de fertilizantes químicos de costos tan elevados en el mercado mundial. Altieri y Nicholls (1994) considera que la combinación armónica y racional de sustancias orgánicas junto a fertilizantes químicos, representan la única solución realista para el aumento de los rendimientos, de la fertilidad del suelo y para evitar la contaminación del medio ambiente.

Los histogramas de distribución de frecuencia para las muestras de suelo tomadas del mismo campo se muestran en la Figura 6a. Al respecto, para el área agrícola de Conyedo se observó un máximo local que corresponde a una distribución de frecuencia de 18 muestras que representó 75% del total en el intervalo de 2,60 a 3,20%, cuyos valores se clasifican de bajos a medianos.

El mayor número de las muestras restantes se distribuyó hacia el lado derecho de este máximo local e incluyó un total de 4 muestras para un 16,67% de todas las analizadas en este grupo, donde sus valores en el rango de 3,20 a 3,80% se clasifican como medianos. Se observó que a la izquierda de este máximo absoluto solo se distribuyeron 2 muestras que equivalen al 8,33%. El coeficiente de asimetría fue negativo con -0,20, mientras que el de curtosis fue de 1,18.

En el caso del histograma de frecuencia de las muestras colectadas en Albarrán (Figura 6b), de un total de 24 muestras de suelo, se obtuvo un máximo local de 12 en el intervalo de 2,85 a 3,05%, lo que representa el 50% del total. Estos valores se clasifican de bajos a medianos según la escala utilizada en esta investigación. Hacia la izquierda de este máximo, se distribuyeron la mayoría de las muestras restantes, con un total de 9 para un 37,5%, con valores de 2,60 a 2,85%, que son bajos. En este histograma se obtuvo un coeficiente de asimetría de 0,92, mientras que el de curtosis fue de 2,14.

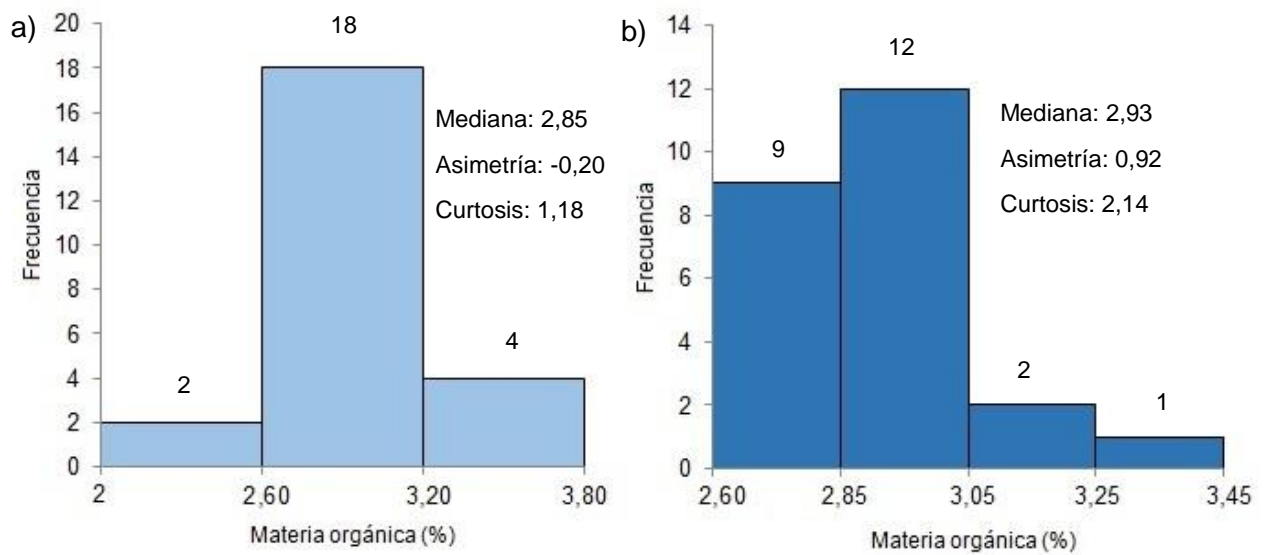


Figura 6. Distribución de la frecuencia de la materia orgánica del suelo en campos específicos

Leyenda:

- a) Campo específico del área agrícola de Conyedo;
- b) Campo específicos del área agrícola de Albarrán

Al igual que en el paisaje edáfico estos resultados pueden haber estado influenciados por el efecto del manejo agrotécnico puesto en práctica comúnmente en los sistemas producción agrícola utilizados en esta empresa, para la producción de cultivos varios, y que tienen una influencia directa en el contenido de materia orgánica del suelo. Entre estas prácticas de manejo se incluyen los patrones de mecanización de los sistemas agrícolas cubanos convencionales.

El uso de implementos como la grada de discos provoca la desintegración del suelo y acelera la oxidación de la materia orgánica. En correspondencia con lo referido por Barzegar *et al.* (2000), las prácticas agrícolas con uso intensivo de maquinaria y el déficit en la aplicación de materia orgánica causan el deterioro de la estructura del suelo y aumentan la compactación.

Específicamente en el manejo de la fertilización del suelo, de acuerdo con los datos reportados por el Instituto de Suelos (2006), el 69,6% de los suelos tienen bajo contenido de materia orgánica, mientras que el 43,3% están erosionados en un rango que varía de fuerte a median. Esto causa limitaciones en la productividad agrícola, por lo que resulta importante adoptar alternativas agroecológicas para acometer de forma gradual acciones de manejo contribuyan a minimizar estos efectos negativos sobre el suelo y brinden soluciones positivas a corto, mediano y largo plazo.

El manejo ecológico de suelos tiene una vital importancia para potenciar su capacidad productiva en beneficio del hombre, lo que coincide con lo reportado por Funes-Monzote *et al.* (2008), acerca de que la solución de los principales problemas que afectan los suelos agrícolas de Cuba debe ser vista, con un enfoque sistémico e integrador y no como una solución aislada, pues se concatenan factores naturales y otros de origen antropogénico.

En la Tabla 9 se muestran los CV para los campos específicos muestreados. Los mayores valores se observaron en Conyedo con 37%, mientras que el CV más bajo se obtuvo en Albarrán (19,13%). Estos resultados implican una variabilidad espacial moderada y baja, para los campos de Conyedo y Albarrán respectivamente, de acuerdo

a los criterios de clasificación utilizados. Estos resultados contribuirían a que los responsables de la toma de decisiones puedan utilizar las investigaciones tradicionales de este parámetro de fertilidad del suelo, junto con los datos que aportan los mapas sobre estudios del suelo, en combinación con la geoestadística para respaldar la planificación de la gestión como una medida de la sostenibilidad.

Tabla 9. Variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo en campos específicos

Campos específicos	CV (%)	Clasificación
Conyedo	37,00	Moderada
Albarrán	19,13	Baja

En correspondencia con los criterios de Whelan y McBratney (2000), el manejo por sitio específico de los cultivos tiene como objetivo el ajuste de la aplicación de prácticas agronómicas acordes a la variabilidad espacial y temporal de los factores que inciden en el rendimiento. Para ello es necesario que la magnitud de dicha variabilidad sea suficiente para justificar un manejo diferenciado y que a su vez tenga una estructura espacial acorde a las posibilidades de manejo.

4.3. Modelos de calibración y validación de la materia orgánica del suelo

La Figura 7 muestra el modelo de calibración donde se observa la dispersión de los valores de materia orgánica estimados mediante la técnica vis-NIR, frente a los valores medidos por el método convencional. Los puntos que representan los datos de las muestras no tienden a tener una dispersión extensa en todo el rango evaluado para este modelo. Lo anterior implica que existe una mayor precisión en la estimación de este parámetro, donde el modelo presentó un ajuste, que se clasifica en la categoría de muy bien acorde a la escala utilizada en esta investigación, dado que explicó el 95% de la variación ($R^2 = 0,95$). Esta representación gráfica de diagrama de dispersión o nube de puntos resulta muy útil para describir el comportamiento conjunto de estas dos variables (valores medidos y valores estimados), donde cada caso aparece representado como un punto en el plano definido por las variables.

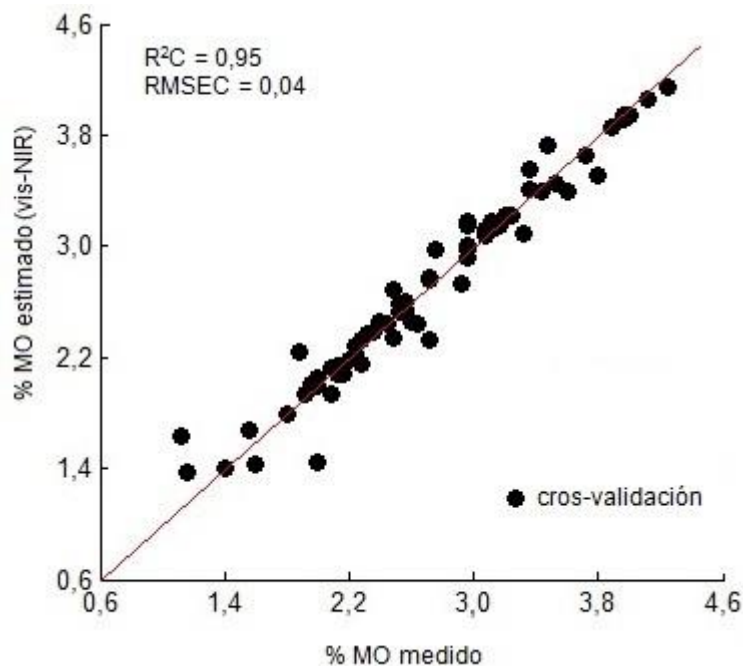


Figura 7. Modelo de calibración vis-NIR para la materia orgánica evaluada en el paisaje edáfico

Estos resultados coinciden con lo reportado por Jarquin-Sánchez *et al.* (2011), cuando refieren que la ventaja de usar la espectroscopia vis-NIR reside en la gran selectividad de la técnica para cuantificar un elemento químico en una mezcla compleja sin trabajo previo de separación. Además permite evaluar la cantidad del parámetro en pocos minutos en muestras de diferentes suelos.

Los resultados presentados en la literatura también muestran gran variación en la exactitud de predicción de propiedades de suelo por la técnica vis-NIR. Entre los factores que pudieran resultar en la obtención de diferentes resultados entre los estudios se mencionan la procedencia de las muestras, dado que pueden proceder de diferentes regiones geográficas y agroecológicas, la preparación de las muestras, fundamentalmente el tamaño de partícula, y los procedimientos de calibración (Nduwamungu *et al.*, 2009a; 2009b).

La Figura 8 muestra los modelos de validación, donde se observa la dispersión de los mejores valores de materia orgánica del suelo estimados por la técnica vis-NIR, frente a los valores medidos por el método convencional.

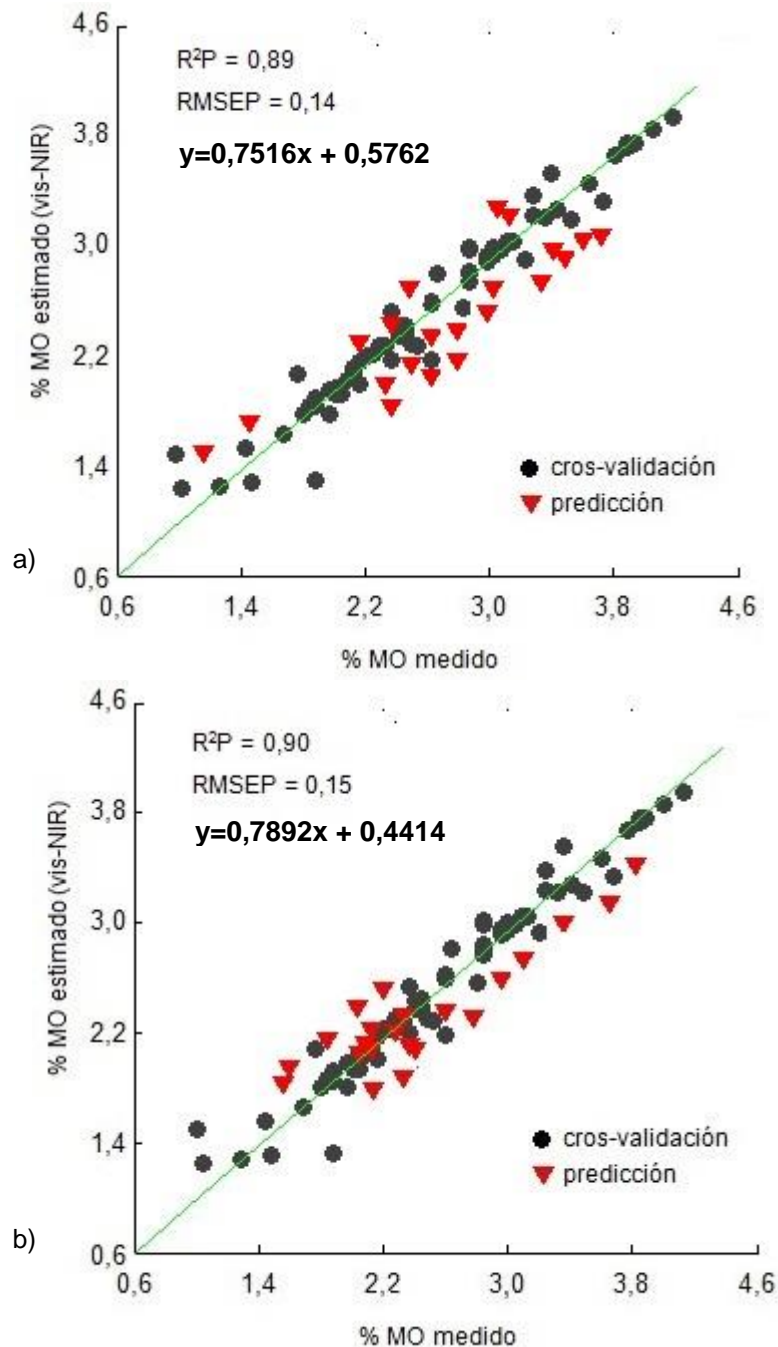


Figura 8. Modelos de validación: correlación entre los valores de materia orgánica del suelo medidos por el método convencional y los estimados por espectroscopia vis-NIR
a) campo específico de Conyedo; b) campo específico de Albarrán

Para este parámetro de fertilidad los puntos que representan los datos se agruparon estrechamente en torno a la línea de tendencia, tanto en la calibración como en la predicción, en ambos campos específicos. En la validación cruzada, el mejor coeficiente de predicción (R^2) se obtuvo para las muestras colectadas en el área de Albarrán ($R^2=0,90$), mientras que para las de Conyedo este coeficiente fue de 0,89, cuando se aplicó el análisis de regresión PLS. De acuerdo a los criterios utilizados estos modelos se clasifican en el rango de Muy Bien y Bien para las muestras de suelo de Albarrán y Conyedo respectivamente. Estos resultados indican que es posible obtener la predicción de este parámetro de fertilidad en nuevas muestras de basada en los espectros vis-NIR, precisión y confiabilidad.

Los resultados se corresponden con los reportados por Chacón-Iznaga (2014) y Chacón-Iznaga *et al.* (2014), que al evaluar diferentes propiedades de suelo en diferentes áreas destinadas al cultivo de caña de azúcar, obtuvo los mejores resultados de predicción para materia orgánica ($0,89 \leq R^2 \leq 0,92$). También fueron muy similares a los obtenidos por He *et al.* (2007). Estos autores lograron buenas predicciones cuando aplicaron el modelo PLS ($R^2=0,93$). Por otra parte no coinciden con los obtenidos por Rodríguez-Cabrera (2015), que para este parámetro de fertilidad obtuvo un coeficiente R^2 de 0,66. De igual forma, en el estudio realizado por Wetterlind *et al.* (2008) las estadísticas de validación indicaron que las calibraciones vis-NIR para materia orgánica estaban en el rango de Bien ($R^2 = 0,89$ y $R^2 = 0,87$).

Por otra parte, los resultados están en línea con lo reportado por Stenberg *et al.* (2010), cuando refieren que la materia orgánica es uno de los componentes fundamentales del suelo que tiene características de absorción bien reconocibles en la región vis-NIR. Las vibraciones fundamentales de las moléculas orgánicas corresponden a la región del infrarrojo medio (IR medio), mientras que sus sobretonos y combinaciones de bandas vibracionales se pueden observar en la región vis-NIR.

Los resultados de los modelos de regresión anteriores de la materia orgánica de las muestras de suelo colectadas en los campos específicos se resumen en la Tabla 10. Se observó que en el set de validación los coeficientes de determinación para la predicción (R^2P) fueron más bajos que en los del set de calibración, mientras que los errores cuadráticos medios (RMSEP) fueron más altos. Al utilizar los valores de la validación cruzada se obtuvieron valores de RPD más altos en el área muestreada en Albarrán con 3,22.

Tabla 10. Estadísticos de calibración y predicción de los modelos

Estadísticos	Campos específicos	
	Conyedo	Albarrán
R^2C^a	0,95	0,95
R^2CV^b	0,94	0,94
R^2P^c	0,89	0,90
RMSEC ^d	0,07	0,08
RMSECV ^e	0,09	0,11
RMSEP ^f	0,14	0,15
RPD ^g	3,05	3,22
RER ^h	8,41	8,88
C Bias ⁱ	0	-1,33
CV Bias ^j	0	7,75
P Bias ^k	-0,07	-0,08

R^2 - coeficiente de determinación; **RMSE**- error cuadrático medio; **RPD**- relación de desviación de rendimiento; **RER**- relación de rango de error; **RPD**- diferencia porcentual relativa; **C**- Calibración; **CV**- Validación cruzada; **P**- Predicción.

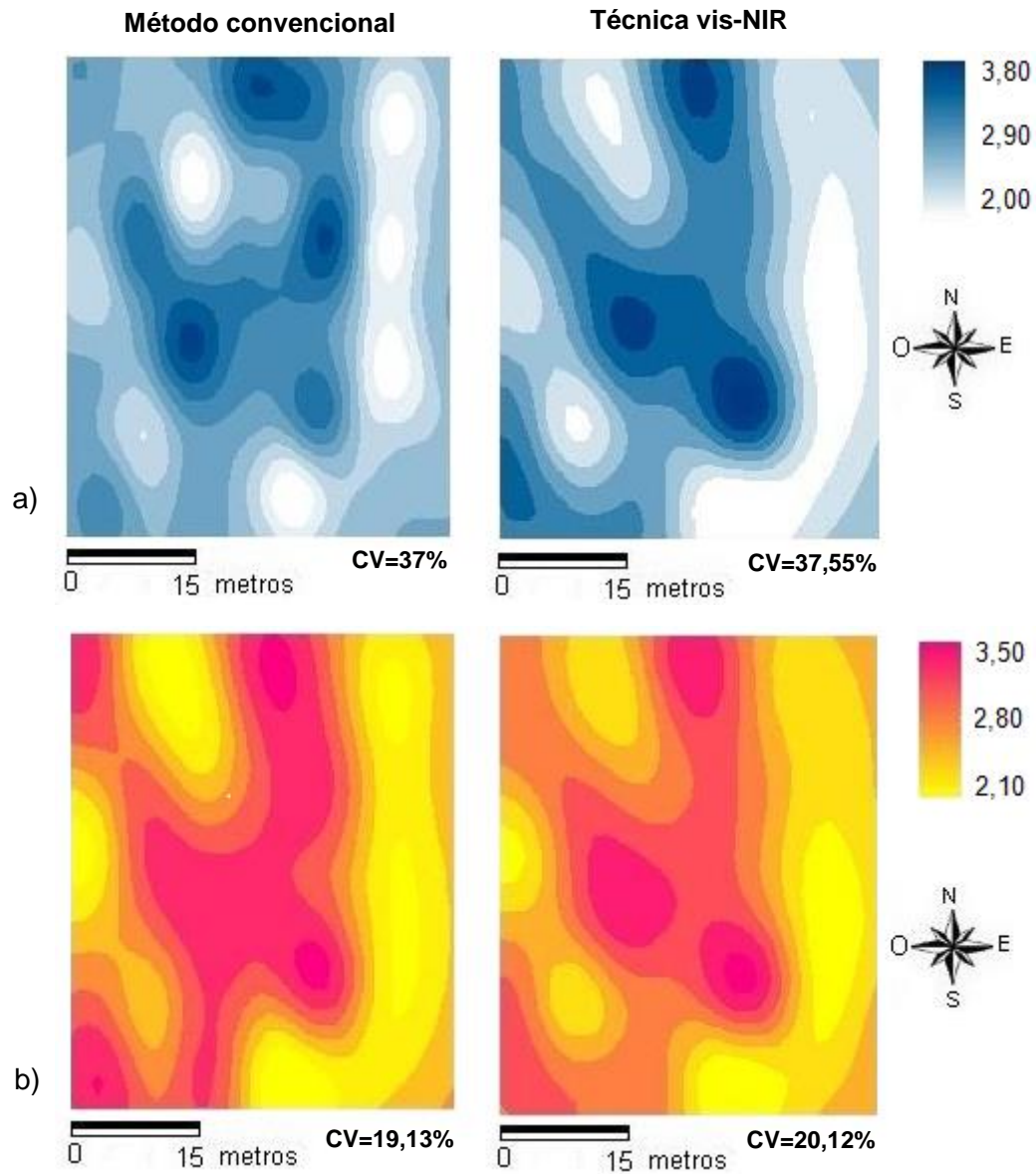
Esto se debe a que la variabilidad dentro de un campo tiende a ser menor que la variabilidad entre diferentes campos y algunas de las correlaciones no específicas que existen entre los espectros y las propiedades químicas del paisaje edáfico pueden no existir en un campo específico. Lo anterior coincide con lo reportado por Dardenne *et al.* (2000) y Bilgili *et al.* (2010).

Los resultados están en correspondencia con lo reportado por Bilgili *et al.* (2010), los cuales obtuvieron excelentes predicciones para la materia orgánica del suelo. Estos autores consideran que las características del sitio muestreado y de los procedimientos utilizados tanto para el análisis convencional como el vis-NIR, tienen un efecto en la precisión del método. La selección de los datos usados en la validación tiene influencia en el resultado del cálculo de RPD.

4.4. Mapas de la distribución espacial de la materia orgánica del suelo

Los mapas son muy útiles para visualizar la variabilidad espacial de los parámetros de fertilidad del suelo. La Figura 9 presenta los mapas interpolados con los valores de materia orgánica obtenidos por el método convencional y los estimados mediante la técnica vis-NIR para los dos campos específicos evaluados. El mapeo de los parámetros de fertilidad del suelo hizo posible analizar e interpretar la variabilidad espacial dentro de un campo. Cuando se comparó en cada campo el mapa desarrollado con los valores convencionales y el de valores estimados vis-NIR, se observó que fueron muy similares, según la distribución del patrón de colores, que indican el contenido correspondiente a este parámetro de fertilidad del suelo. En esta investigación, las muestras de suelo con los valores más altos de materia orgánica del suelo tienden a ubicarse en la parte central dentro del campo específico. Esta tendencia fue más notable en el campo de Albarrán.

La materia orgánica evaluada en el campo específico de Conyedo mostró una menor diferencia entre los CV de ambos mapas, con valores comparables de 37% y 37,55% para el método convencional y los estimados por espectroscopia vis-NIR respectivamente, que clasifican a esta variabilidad espacial como moderada. En el caso del campo específico de Albarrán se observó una diferencia mayor entre estos mapas que la observada en Conyedo, aunque también mostraron similitud entre sí con CV de 19,13 y 20,14% para el mapa desarrollado con los valores medidos convencionalmente y los estimados mediante la técnica vis-NIR, los cuales implican una baja variabilidad.



**Figura 9. Mapas obtenidos con los valores de materia orgánica del suelo medidos por el método convencional y los estimados mediante espectroscopia vis-NIR
a) Conyedo; b) Albarrán**

Leyenda: CV- Coeficiente de variación

De acuerdo con Brouder *et al.* (2001) es importante observar no solo qué factores varían, sino también si su variabilidad es independiente o está vinculada a otro factor al estudiar y gestionar varios factores que sean variables. Por lo general, la variabilidad espacial se utiliza para predecir o estimar valores en ubicaciones no muestreadas dentro de las regiones, zonas o áreas de interés agrícola.

La magnitud y los patrones espaciales de variabilidad tienen implicaciones para las prácticas de manejo de fertilizantes por sitio específico. Por ejemplo, Mahinakbarzadeh *et al.* (1991) encontraron que el contenido de materia orgánica del suelo mostraba una tendencia más débil cuando se investigaba la variabilidad espacial de este parámetro en varios transectos ubicados dentro de una unidad de un mapa de suelos.

Lo anterior implica que la caracterización de la heterogeneidad espacial en las propiedades químicas de suelo como la materia orgánica en los campos agrícolas, es importante para identificar la escala de variación espacial de este parámetro de fertilidad del suelo. Esta caracterización contribuye a una gestión de fertilizantes más eficiente y eficaz, y se ha realizado en todo el mundo.

Por otra parte, Moore *et al.* (1993) y Florinsky *et al.* (2002), refieren que los estudios de suelo convencionales, es decir, realización de muestreo y análisis de fertilidad del suelo, no son suficientes para obtener toda la información cuantitativa sobre la distribución espacial de los parámetros de fertilidad del suelo que se necesita para el uso óptimo de fertilizantes. Es por ello que en la mayoría de los países desarrollados, el muestreo de suelo y el análisis químico, se realizan regularmente para determinar los parámetros promedio de fertilidad del suelo para un campo agrícola. Estos métodos de análisis, como se explicó anteriormente, requieren que las muestras de suelo húmedo recolectadas en el campo se sequen al aire tan pronto como sea posible antes de enviarlas a un laboratorio de análisis de suelo. Después de que concluye todo este proceso de análisis, los resultados finales se comunican a los agricultores para la toma de decisiones sobre el manejo de fertilizantes.

4.5. Correlación entre la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo y el rendimiento del cultivo de boniato

4.5.1. Materia orgánica del suelo y componentes del rendimiento agrícola

Como en cualquier otro cultivo, el rendimiento agrícola final del boniato se puede descomponer en varios componentes, los cuales se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Relación entre materia orgánica del suelo y componentes del rendimiento agrícola del boniato en Conyedo

Cuadrante	Rango MO (%)	Número de raíces comerciales por planta (u)	Peso por raíz comercial	Peso de raíces comerciales por planta
			kg	
1	B - M	4,15 a	0,23 a	0,94 a
2	B - M	4,13 a	0,23 a	0,91 a
3	B	4,10 ab	0,20 ab	0,81 b
4	B - M	4,12 a	0,23 a	0,88 ab
E.E (ȳ)±		0,01	0,01	0,04

*(a,b,c) Medias con letras no comunes en la misma columna difieren significativamente para $p < 0,05$, según la prueba de Tukey HSD (1994).

Legenda: **B-** Bajo; **M-** Mediano

Se observó que el valor máximo del número de raíces comerciales por planta correspondió a las plantas del cuadrante 2 con un valor de 4,15, el cual no mostró diferencias estadísticas significativas con relación a los demás cuadrantes. En el peso por raíz comercial, el mayor valor fue de 0,23 kg y correspondió a las plantas sembradas en los cuadrantes 1; 2 y 4, no obstante no hubo diferencias significativas entre estos y el cuadrante 3. En el peso de raíces comerciales por planta, el mayor valor se observó en las plantas del cuadrante 1 con 0,94 kg, el cual mostró diferencias significativas con las plantas del cuadrante 3. Estos resultados se relacionan con que en el cuadrante 3 los valores de materia orgánica se clasifican en el rango de bajo.

En el campo específico de Albarrán el valor máximo del número de raíces comerciales por plantas, se observó en los cuadrantes 1 y 2 con 4,15. Estos resultados no mostraron diferencias significativas con relación a los demás cuadrantes. En el peso por raíz comercial, igualmente los mayores valores correspondieron a las plantas de estos dos cuadrantes, con 0,26 kg en ambos casos, no obstante tampoco hubo diferencias significativas con relación a los demás. En el peso de raíces comerciales por planta, se observaron diferencias significativas entre las plantas de los cuadrantes 1 y 2 con respecto a las de los cuadrantes 3 y 4, con valores de 1,07 y 1,06 kg respectivamente. En estos cuadrantes la variabilidad espacial de la materia orgánica fue semejante y los valores de este parámetro de fertilidad obtenidos se clasifican de bajos a medianos, influyendo de manera similar sobre estos componentes (Tabla 12).

Tabla 12. Relación entre materia orgánica del suelo y componentes del rendimiento agrícola del boniato en Albarrán

Cuadrante	Rango MO (%)	Número de raíces comerciales por planta (u)	Peso por raíz comercial	Peso de raíces comerciales por planta
			kg	
1	B - M	4,15 a	0,26 a	1,07 a
2	B - M	4,15 a	0,26 a	1,06 a
3	B - M	4,12 ab	0,25 a	1,02 b
4	B - M	4,10 a	0,24 a	1,00 b
E.E (ȳ)±		0,02	0,01	0,03

*(a,b,c) Medias con letras no comunes en la misma columna difieren significativamente para $p < 0,05$, según la prueba de Tukey HSD (1994).

Leyenda: **B-** Bajo; **M-** Mediano

4.5.2. Materia orgánica del suelo y rendimiento agrícola

En el campo específico de Conyedo el valor máximo de materia orgánica del suelo se observó en el cuadrante 1 con 3,16%, que mostró diferencias significativas con respecto a los demás. De igual forma, en el rendimiento agrícola el máximo resultado correspondió a las plantas de este cuadrante con 5,42 t ha⁻¹, que difirió significativamente de los otros, los cuales a su vez mostraron diferencias significativas entre sí. Tanto para la materia orgánica del suelo, como para el rendimiento agrícola, los valores más bajos se obtuvieron en los cuadrantes 2 y 3. El máximo valor de materia orgánica en el campo específico de Albarrán, se observó en el cuadrante 1 con 3,01%, que mostró diferencias significativas con relación a todos los cuadrantes, aunque tuvo cierta semejanza con el cuadrante 2. En el rendimiento agrícola los mejores resultados correspondieron a las plantas de los cuadrantes 1 y 2, con valores de 6,20 y 6,18 t ha⁻¹, los cuales difirieron significativamente de los demás. En los cuadrantes 3 y 4 se observaron los valores más bajos de materia orgánica del suelo y de rendimiento agrícola, que no mostraron diferencias significativas entre sí (Tabla 13).

Tabla 13. Materia orgánica y rendimiento del cultivo según cuadrante muestreado por campo específico

Cuadrante	CE- Conyedo		CE- Albarrán	
	MO (%)	Rend. (t ha ⁻¹)	MO (%)	Rend. (t ha ⁻¹)
1	3,16 a	5,42 a	3,01 a	6,20 a
2	2,79 bc	5,18 c	2,91 ab	6,18 a
3	2,74 bc	5,10 d	2,82 b	6,10 b
4	2,86 b	5,30 b	2,86 b	6,12 b
E.E (ȳ)±	0,13	0,10	0,06	0,03

*(a,b,c) Medias con letras no comunes en la misma columna difieren significativamente para $p < 0,05$, según la prueba de Tukey HSD (1994).

Leyenda:

MO%- valor de media de la materia orgánica del suelo

Rend.- rendimiento agrícola del cultivo de boniato

El modelo de regresión lineal entre la materia orgánica del suelo y el rendimiento agrícola determinado en cada cuadrante, mostró un mejor ajuste en el campo específico de Albarrán, con un coeficiente $R^2 = 0,89$ (Figura 10).

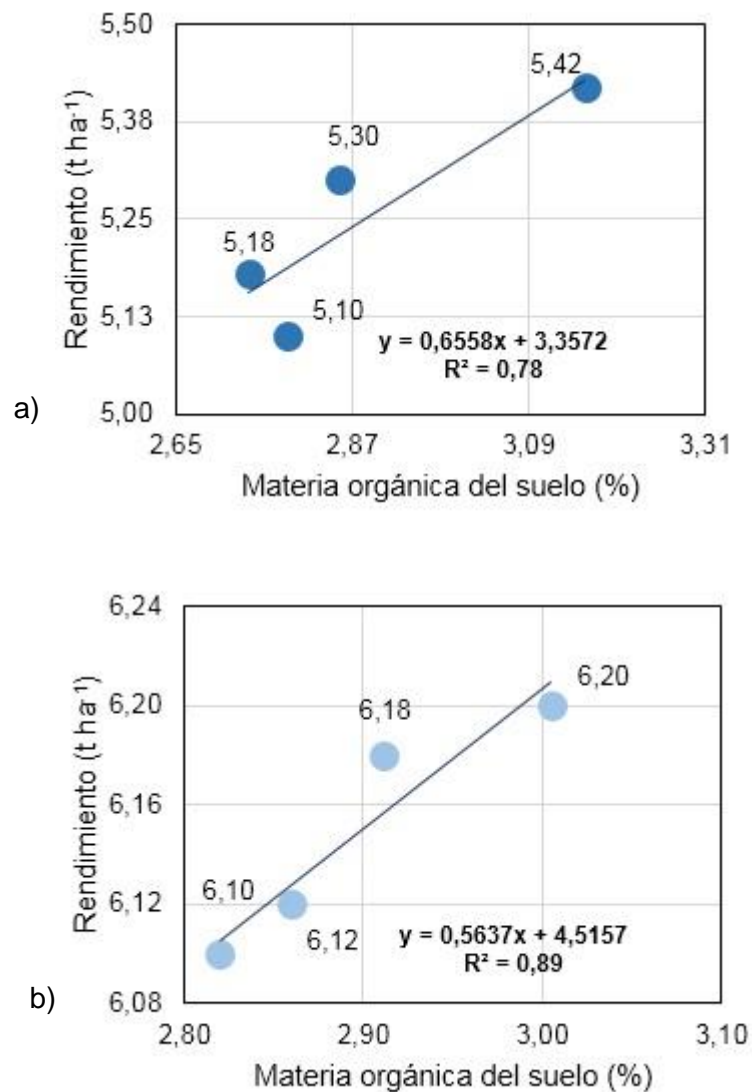


Figura 10. Regresión lineal entre la materia orgánica del suelo y el rendimiento agrícola del cultivo de boniato

a) Campo específico de Conyedo; b) Campo específico de Albarrán

Los ajustes de regresión anteriores, permitieron realizar la predicción del rendimiento en cada uno de los campos específicos, donde se estimó la materia orgánica del suelo mediante la técnica de espectroscopia de reflectancia vis-NIR. La Figura 11 muestra que no hubo diferencias significativas entre el rendimiento agrícola real y el estimado.

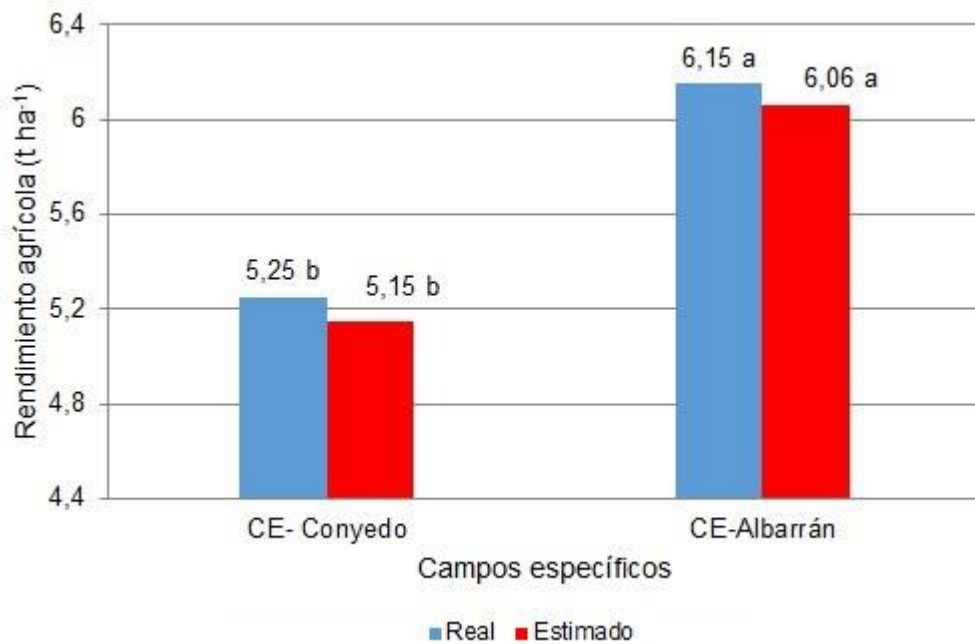


Figura 11. Rendimiento agrícola del cultivo según rangos de materia orgánica del suelo según método de determinación de materia orgánica

*(a,b,c) Medias con letras no comunes difieren significativamente para $p < 0,05$, según la prueba de Tukey HSD (1994)

Los máximos valores se observaron en el campo específico de Albarrán, con un rendimiento agrícola real y estimado de 6,15 y 6,06 t ha⁻¹ respectivamente. Estos resultados mostraron diferencias significativas con los rendimientos obtenidos en el campo específico de Conyedo, donde se alcanzaron los valores más bajos. Se evidencia que el incremento de la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo no actúa positivamente en el rendimiento agrícola del boniato, dado que como se explicó anteriormente, el CV del campo específico de Conyedo es superior o igual al 37%, según el método de determinación utilizado, lo que implica una variabilidad moderada, mientras que en Albarrán los valores de CV clasifican como bajos.

Es importante destacar que en la etapa de cosecha, la acumulación de materia seca está concentrada principalmente en las raíces tuberosas, cuyo peso por planta indica la producción individual que se obtiene en este cultivo. Los rendimientos obtenidos en ambos campos específicos se corresponden con los registros históricos de estas áreas.

De acuerdo con Morales *et al.* (2001), cuando se aplica materia orgánica en boniato, se obtienen alrededor de un 30% más de rendimiento que cuando no se aplica. Si se aplican 14,90 t ha⁻¹ de materia orgánica, disminuyen las afectaciones por Tetuán (*Cylas formicarius* Fab.) en un 25%. Sin embargo, diferentes autores han reconocido los beneficios de la materia orgánica para la productividad de los cultivos. Muchos de estos beneficios han sido bien documentados, pero algunos efectos están íntimamente asociados con otros factores del suelo que es difícil atribuirle solo a la materia orgánica. Otro de los inconvenientes está ligado a la falta de precisiones para definir específicamente las varias fracciones dentro de la materia orgánica del suelo

En Cuba los rendimientos se han ido incrementando de forma lenta pero progresivamente por todo el país. En los últimos años la media nacional supera las 8 t ha⁻¹ y provincias como Artemisa superan las 17 t ha⁻¹ como promedio en unas 5 000 ha anuales, sin embargo los rendimientos son muy bajos, para este cultivo que debe superar las 25 t ha⁻¹.



Conclusiones

5. CONCLUSIONES

1. Las lecturas de reflectancia espectral variaron con la longitud de onda y hubo un incremento de la misma desde la región visible (379 - 780 nm), a la del infrarrojo cercano (780 - 1700 nm).
2. La materia orgánica de suelo mostraron una variabilidad espacial de baja a moderada con coeficientes de variación de 22,52 a 30,55% en el paisaje edáfico y de 19,13 a 37% en los campos específicos.
3. La precisión del modelo de calibración vis-NIR obtenido en el paisaje edáfico, se evaluó de bien, R^2 de 0,89, y de muy bien, R^2 de 0,90, cuando se validó en los campos específicos de Conyedo y Albarrán respectivamente.
4. El mapeo de la materia orgánica medida por el método convencional, y estimada por espectroscopia vis-NIR mostró similitudes entre los CV de ambos mapas, observándose la menor diferencia en el campo específico de Conyedo, con valores de 37% y 37,55% respectivamente.
5. Los máximos valores del rendimiento agrícola real y estimado en el cultivo de boniato, fueron de 6,15 y 6,05 t ha⁻¹ respectivamente y se obtuvieron en el campo específico de Albarrán donde se observó la menor variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo.



Recomendaciones

6. RECOMENDACIONES

1. Comprobar la exactitud y precisión del modelo de calibración desarrollado por la técnica vis-NIR para la predicción de la materia orgánica, en otros campos específicos del área objeto de estudio.
2. Replicar esta investigación con la inclusión de otras propiedades químicas de suelo, en este y en otros tipos de suelo de importancia agrícola de la provincia de Villa Clara.



*Referencias
bibliográficas*



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARCA, O. y BERNABÉ, M.A., 2010. Proyección de la demanda de tierras agrícolas en Venezuela, a partir del análisis de las necesidades alimentarias al año 2020. *Agronomía Tropical*, 60(3), pp.5-22.

ADAMCHUK, V.I., HUMMEL, J.W., MORGAN, M.T. y UPADHYAYA, S.K., 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1), pp.71-91.

ALTIERI, M. y NICHOLLS, C., 2004. Biodiversity and pest management in agroecosystems. CRC Press.

ARANYOS, J.T., TOMÓCSIK, A., MAKÁDI, M., MÉSZÁROS, J. y BLASKÓ, L., 2016. Changes in physical properties of sandy soil after long-term compost treatment. *International Agrophysics*, 30(3), pp.269-274.

ARRIECHE, I., RUÍZ, M., DE CORI, C.E.C., LEÓN, M., AULAR, L.M., MORA, R., CASTILLO, L., TOVAR, M.R., MARTÍNEZ, A., BAPTISTA, H. y DÍAZ, T., 2011. Comparación de dos métodos de análisis en la determinación de materia orgánica de los suelos.

AWE, G.O., REICHERT, J.M., TIMM, L.C. y WENDROTH, O.O., 2015. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. *Plant and soil*, 387(1-2), pp.395-411.

AWETO, A.O., 1982. Variability of upper slope soils developed under sandstones in South-western Nigeria. *Georg. J*, 25, pp.27-37.

BARZEGAR, A.R., ASOODAR, M.A. y ANSARI, M., 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil and Tillage Research*, 57(3), pp.167-172.

BÁSCONES, E., 2005. Análisis de suelo y consejos de abonado. *Valladolid: INEA*.

BILGILI, A.V., VAN ES, H.M., AKBAS, F., DURAK, A. y HIVELY, W.D., 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *Journal of Arid Environments*, 74(2), pp.229-238.

BROUDER, S., HOFMANN, B. y REETZ, H.F., 2001. Evaluating spatial variability of soil parameters for input management. *Better Crops*, 85(2), pp.8-11.

BURÉS, S., 2004. La descomposición de la materia orgánica. [Documento en línea]. Recuperado de: <http://www.inforganic.com/node/484>.

CASAL, C., 2013. Implantación De La Tecnología NIRS En Aplicaciones in-Situ Como Herramienta De Apoyo a Las Decisiones En El Sector Primario. *Trabajo fin de Máster. Universidad de Oviedo*.

CÉCILLON, L. y BRUN, J.J., 2007. Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS): a practical tool for the assessment of soil carbon and nitrogen budget.

CÉCILLON, L., CERTINI, G., LANGE, H., FORTE, C. y STRAND, L.T., 2012. Spectral fingerprinting of soil organic matter composition. *Organic geochemistry*, 46, pp.127-136.

CHACÓN-IZNAGA, A., 2014. Vis/NIR spectroscopic measurement of selected fertility parameters of Cuban agricultural soils, 143pp (Doctoral dissertation, Tesis en opción al grado de Doctor in de Bio-ingenieurswetenschappen, Faculteit Bioingenieurswetenschappe, Katholieke Universiteit Leuven).

CHACÓN-IZNAGA, A., RODRÍGUEZ-OROZCO, M., AGUILA-ALCANTARA, E., CARRAL-PAIROL, M., DÍAZ-SICILIA, Y.E., DE BAERDEMAEKER, J. y SAEYS, W., 2014. Vis/NIR spectroscopic measurement of selected soil fertility parameters of Cuban agricultural Cambisols. *Biosystems engineering*, 125, pp.105-121.

CHANG, C.W., LAIRD, D.A., MAUSBACH, M.J. y HURBURGH, C.R., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy–principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), pp.480-490.

CHOUDHURY, S., 2013. An introduction to geographic information technology. IK International Pvt Ltd.

CONFORTI, R., DE LEONI, M., LA ROSA, M., VAN DER AALST, W.M. y TER HOFSTEDE, A.H., 2015. A recommendation system for predicting risks across multiple business process instances. *Decision Support Systems*, 69, pp.1-19.

CORBELLA, R. y FERNÁNDEZ, J., 2010. Materia orgánica del suelo. Tucumán, Argentina: Universidad Nacional de Tucumán. fixing *Streptomyces* in soils of the badlands of South Dakota. *Microbiological Research*, 195, pp.31-39.

CORWIN, D.L., KAFFKA, S.R., HOPMANS, J.W., MORI, Y., VAN GROENIGEN, J.W., VAN KESSEL, C., LESCH, S.M. y OSTER, J.D., 2003. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, 114(3-4), pp.231-259.

CUBILLA, M.M., 2014. Manejo del suelo, fertilidad y nutrición de la soja para aumentar la capacidad productiva en la región oriental del Paraguay. Testing Operation Manager. Monsanto, Paraguay.

DARDENNE, P., SINNAEVE, G. y BAETEN, V., 2000. Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: which method?. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 8(4), pp.229-237.

DAVIS, J. C., 1986. Statistics and data analysis in geology, 1986. *Willey & Sons, New York*.

DÍAZ, I., GONZÁLEZ, C., REYES, J. L., CARÓN, M. y DELGADO, E., 2013. Digestión de follaje de batatas (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) en cerdos. Digestibilidad in vitro ileal y fecal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(3).

DOCAMPO, R., 2010. La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. *Serie Actividades de Difusión*, (687).

DOMÍNGUEZ, J., AIRA, M. y GÓMEZ-BRANDÓN, M., 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Revista Ecosistemas*, 18(2).

SAMANIEGO-PLASENCIA, D.S., 2012. Manejo ecológico del suelo como fundamento de los procesos de transición hacia la agroecología (Bachelor's thesis). *Universidad de Cuenca Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería Agronómica*, pp.1-99.

FINKE, P. Y MONTANARELLA, L., 2001. Basic Principals of the Manual of Procedures (Version 1.1) for the Georeferenced Soil Database. *Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches*, (34), pp.49-65.

FLORINSKY, I. V., EILERS, R.G., MANNING, G.R. y FULLER, L. G., 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling & Software*, 17(3), pp.295-311.

FORMENT, S. y HANSELAER, P., 2010. Stray light performance of a combined monochromator–spectrograph UV irradiance measuring instrument. *Measurement Science and Technology*, 21(8), p.085304.

GAJDA, A.M., CZYŻ, E.A. y DEXTER, A.R., 2016. Effects of long-term use of different farming systems on some physical, chemical and microbiological parameters of soil quality. *International Agrophysics*, 30(2), pp.165-172.

GARCÍA, L. E., 2013. Estrategias para la recuperación de suelos degradados en ambientes semiáridos: adición de dosis elevadas de residuos orgánicos de origen urbano y su implicación en la fijación de carbono (Doctoral dissertation, Universidad de Murcia), 363 p.

GARCÍA, A., PÉREZ, M., MÉNDEZ, A.A.G. y MADRIZ, P., 2016. Caracterización postcosecha y composición química de la batata (*Ipomoea batatas* (L.) Lamb.) variedad Topera. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), pp.287-300.

GARCÍA, J.A. y YAÑEZ, E.E., 2010. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 31(2), pp.41-48.

GOMEZ, C., ROSSEL, R.A.V. y MCBRATNEY, A.B., 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 146(3-4), pp.403-411.

GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A., GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, R., DE LA ROSA-JOSÉ M., y GONZÁLEZ-VILA, F. J., 2011. El fuego y la materia orgánica del suelo. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, España, 2, pp. 8 - 14.

GUILLÉN, A., DEL MORAL, F.G., HERRERA, L.J., RUBIO, G., ROJAS, I., VALENZUELA, O. y POMARES, H., 2010. Using near-infrared spectroscopy in the classification of white and iberian pork with neural networks. *Neural Computing and Applications*, 19(3), pp.465-470.

GUIMARÃES - COUTO, E., STEIN, A. y KLAMT, E., 1997. Large area spatial variability of soil chemical properties in central Brazil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 66(2), pp.139-152.

HE, Y., HUANG, M., GARCÍA, A., HERNÁNDEZ, A. y SONG, H., 2007. Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(2), pp.144-153.

HERNÁNDEZ, A., PÉREZ, J., BOSCH, D. y CASTRO, N., 2015. *Clasificación de los suelos de Cuba 2015. edit. Ediciones INCA, Mayabeque, Cuba, 93 p.*

HERNÁNDEZ, J.C., 2013. Edafología y fertilidad. *Universidad Nacional Abierta ya Distancia. Bogotá, Colombia.*

INSTITUTO DE SUELOS, 2006. La evaluación de tierras, base para el monitoreo de la degradación de los suelos. En: Resúmenes del Taller "La metodología LADA y la evaluación de las tierras de Cuba", La Habana, Cuba, 25 p.

IRONS, J. R., WEISMILLER, R. A., y PETERSEN, G. W., 1989. Soil reflectance. *In: G. Asrar Ed., Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Wiley, New York, pp. 66-106.

JARQUÍN-SÁNCHEZ, A., SALGADO-GARCÍA, S., PALMA-LÓPEZ, D.J., CAMACHO-CHIUI, W. y GUERRETO-PEÑA, A., 2011. Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarojo cercano (NIRS) y quimiometría. *Agrociencia*, 45(6), pp.653-662.

JIMARÉ-BENITO, M.T., BOSCH-OJEDA, C. y SANCHEZ-ROJAS, F., 2008. Process analytical chemistry: applications of near infrared spectrometry in environmental and food analysis: an overview. *Applied Spectroscopy Reviews*, 43(5), pp.452-484.

JULCA-OTINIANO, A., MENESES-FLORIÁN, L., BLAS-SEVILLANO, R. y BELLO-AMEZ, S., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), pp.49-61.

KUANG, B. y MOUAZEN, A.M., 2012. Influence of the number of samples on prediction error of visible and near infrared spectroscopy of selected soil properties at the farm scale. *European Journal of Soil Science*, 63(3), pp. 421-429.

LABRADOR, J. 2008. Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. *SEAE-Sociedad Española de Agricultura Ecológica*, pp.1-47.

LÓPEZ, G., FUENTES, E. y VÁZQUEZ, H., 1981. Resumen sobre los elementos fundamentales que deben ser redactados en cada epígrafe del informe de suelos por municipio a escala 1/25000. La Habana: MINAG, Departamento de Suelos y Agroquímica, Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes.

LÓPEZ, M. A. y ESPINOZA, M. J., 1995. Manual de nutrición y fertilización del banano. Corporación Bananera Nacional (CORBANA), Pococí (Costa Rica) Instituto de la Potasa y el Fósforo, Querétaro (México).

MAHINAKBARZADEH, M., SIMKINS, S. y VENEMAN, P.L.M., 1991. Spatial variability of organic matter content in selected Massachusetts map units. *Spatial variabilities of soils and landforms*, (spatialvariabil), pp.231-242.

MALLEY, D.F., MARTIN, P.D. y BEN-DOR, E., 2004. Application in analysis of soils. *Near-infrared spectroscopy in agriculture*, (nearinfraredspe), pp.729-784.

MARTINEZ-OLIVA, E. y GONZALEZ-NOVO, M., 2007. Instructivo técnico del cultivo del boniato. Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales, Villa Clara (Cuba). Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales, Villa Clara (Cuba).

MINAG (Ministerio de la Agricultura), 2015. Informe Estadístico Anual del Ministerio de la Agricultura de Cuba. Disponible en: Biblioteca INIVIT, 20 p.

MONIC, V., 2003. Determinación del contenido de materia orgánica en suelos Guatemaltecos por medio de la técnica de reflectancia con espectroscopía de infrarrojo cercano (Doctoral dissertation, Tesis presentada para optar el título de Química. Guatemala. 7-9 p).

FUNES-MONZOTE, F. R. 2008. Farming like we're here to stay: the mixed farming alternative for. Cuba. PhD thesis, Wageningen University.

MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A. y PETERSON, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), pp.443-452.

MORALES, A., 2001. Aspectos generales sobre el cultivo del camote (boniato) en Cuba/Alfredo MT, E, N. Maza. *Manejo Integrado del Gorgojo del Camote o Tetuán del boniato, Cylas formicarius (Fab.), en Cuba. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa (CIP)*, pp.1-11.

MORALES, M., 2003. La materia orgánica y el estado de fertilidad de los suelos Pardos con Carbonatos bajo diferentes sistemas de manejo (Tesis de Maestría Facultad de Ciencias Agropecuarias. UCLV).

MORÓN, A., MARTINO, D. y RESTAINO, E., 1994. Manejo y fertilidad de suelos. *INIA Serie Técnica*; 42.

MOUAZEN, A.M., KAROUI, R., De BAERDEMAEKER, J. y RAMON, H., 2006. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra. *Soil Science Society of America Journal*, 70(4), pp.1295-1302.

MURPHY, C.L., MACLEOD, A.P., CHAPMAN, G.A., MILFORD, H.B., MCGAW, A.J.E., EDYE, J.A. y SIMONS, N.A., 2001. NSW state soil landscape mapping program and derivative products. In: *Proceedings of the Geospatial Information and Agriculture Symposium, Sydney 2001*.

NDUWAMUNGU, C., ZIADI, N., TREMBLAY, G.F. y PARENT, L.E., 2009. Near-infrared reflectance spectroscopy prediction of soil properties: Effects of sample cups and preparation. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), pp.1896-1903.

OLIVET-RODRÍGUEZ, Y.E., ORTIZ-RODRÍGUEZ, A., COBAS-HERNÁNDEZ, D., BLANCO-BLANCO, A. y HERRERA-GONZÁLEZ, E., 2012. Evaluación de la labor de rotura con dos aperos de labranza para el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* Lam) en un Fluvisol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4), pp.24-29.

RIBÓ-HERRERO, M., 2005. Balance de macronutrientes y materia orgánica en el suelo de agrosistemas hortícolas con manejo integrado y ecológico (Doctoral dissertation, Universitat de València).

RIBÓ-ARNAU, A., ELÍAS, M., OLIVA, F., GUERRERO MARÍN, J.M., AVILÉS MIRA, L., BARRIO LOZANO, J. y MOLINAS DAVÍ, J., 2012. Base de datos PostGIS para la gestión de riesgos en la microrregión “Mélida Anaya Montes” (El Salvador).

RODRÍGUEZ-CABRERA, J., 2015. Determinación de propiedades químicas de suelos pardos mullidos medianamente lavados mediante espectroscopia de reflectancia VIS/NIR (Tesis de Maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas).

SARKHOT, D.V., GRUNWALD, S., GE, Y. y MORGAN, C.L.S., 2011. Comparison and detection of total and available soil carbon fractions using visible/near infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 164(1-2), pp.22-32.

SCHIRRMANN, M. y DOMSCH, H., 2011. Sampling procedure simulating on-the-go sensing for soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(2), pp.333-343.

SHI, Z., JI, W., VISCARRA ROSSEL, R.A., CHEN, S. y ZHOU, Y., 2015. Prediction of soil organic matter using a spatially constrained local partial least squares regression and the Chinese vis–NIR spectral library. *European Journal of Soil Science*, 66(4), pp. 679-687.

STENBERG, B., ROSSEL, R.A.V., MOUAZEN, A.M. y WETTERLIND, J., 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. In *Advances in agronomy* (Vol. 107, pp. 163-215). Academic Press.

STEVENS, A., UDELHOVEN, T., DENIS, A., TYCHON, B., LIOY, R., HOFFMANN, L. y VAN WESEMAEL, B., 2010. Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy. *Geoderma*, 158(1-2), pp.32-45.

STUART, B., 2004. Spectral analysis. *Infrared spectroscopy: fundamentals and applications*, pp.45-70.

TECHEIRA, N., SÍVOLI, L., PERDOMO, B., RAMÍREZ, A. y SOSA, F., 2014. Caracterización fisicoquímica, funcional y nutricional de harinas crudas obtenidas a partir de diferentes variedades de yuca (*Manihot esculenta* Crantz), batata (*Ipomoea batatas* Lam) y ñame (*Dioscorea alata*), cultivadas en Venezuela. *Interciencia*, 39(3).

THEOPHANIDES, T. (ed.), 2012. Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology. *InTech*, 524 p.

ULMSCHNEIDER, M. y ROGGO, Y., 2008. Process analytical technology, in: Gad, S.C. (Ed.), *Pharmaceutical Manufacturing Handbook*. Hoboken, N.J., Wiley-Interscience, pp. 353-410.

VÁSQUEZ-PROAÑO, D. F., 2012. Producción y Evaluación de Cuatro Tipos de Bioabonos como Alternativa Biotecnológica de Uso de Residuos Orgánicos para la Fertilización de Pasto (Bachelor's thesis).

VESETH, R., 1986. Managing Variable Soils PNW Conservation tillage handbook series. Chapter 6 – Fertility (6). Pacific Northwest Solutions to Environmental and Economic Problems (STEEP), reprinted 1989, Univ. of Idaho, Oregon State Univ., Washington State Univ., USDA-ARS, and NRCS, Washington, DC.

VON WALLIS, A., 2013. Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandudult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación del terreno forestal y bosque nativo (Doctoral dissertation, Tesis de maestría). Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina).

WALKLEY, A. y BLACK, I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), pp.29-38.

WETTERLIND, J., STENBERG, B. y JONSSON, A., 2008. Near infrared reflectance spectroscopy compared with soil clay and organic matter content for estimating within-field variation in N uptake in cereals. *Plant and Soil*, 302(1-2), pp.317-327.

WHELAN, B. M. Y MCBRATNEY, A. B., 2000. The “null hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture*, 2(3), pp.265-279.



Anexos

8. ANEXOS

Tabla 14. Curva de materia orgánica en % por el método de Walkley-Black.

Lectura (T)	Abs	% MO	Lectura (T)	Abs	% M.O.
100		0	73,5		4,44
99,5		0,06	73		4,52
99		0,123	72,5		4,59
98,5		0,184	72		4,66
98		0,246	71,5		4,73
97,5		0,307	71		4,84
97		0,37	70,5		4,95
96,5		0,43	70		5,05
96		0,52	69,5		5,16
95,5		0,602	69		5,27
95		0,69	68,5		5,38
94,5		0,77	68		5,48
94		0,86	67,5		5,59
93,5		1	67		5,7
93		1,15	66,5		5,81
92,5		1,29	66		5,91
92		1,43	65,5		6,02
91,5		1,58	65		6,13
91		1,72	64,5		6,24
90,5		1,79	64		6,34
90		1,86	63,5		6,45
89,5		1,94	63		6,56
89		2,01	62,5		6,67
88,5		2,08	62		6,77
88		2,15	61,5		6,88
87,5		2,29	61		6,99
87		2,44	60,5		7,1
86,5		2,58	60		7,2
86		2,62	59,5		7,31
85,5		2,66	59		7,42
85		2,7	58,5		7,53
84,5		2,74	58		7,63
84		2,78	57,5		7,74
83,5		2,81	57		7,85
83		2,85	56,5		7,96
82,5		2,9	56		8,06
82		2,93	55,5		8,17
81,5		2,97	55		8,28
81		3,01	54,5		8,39
80,5		3,08	54		8,49
80		3,15	53,5		8,6
79,5		3,23	53		8,71
79		3,3	52,5		8,82
78,5		3,37	52		8,92
78		3,44	51,5		9,03
77,5		3,55	51		9,14
77		3,66	50,5		9,25
76,5		3,76	50		9,35
76		3,87	49,5		9,46
75,5		4,01	49		9,57
75		4,16	48,5		9,68
74,5		4,3	48		9,78
74		4,37	47,5		9,89

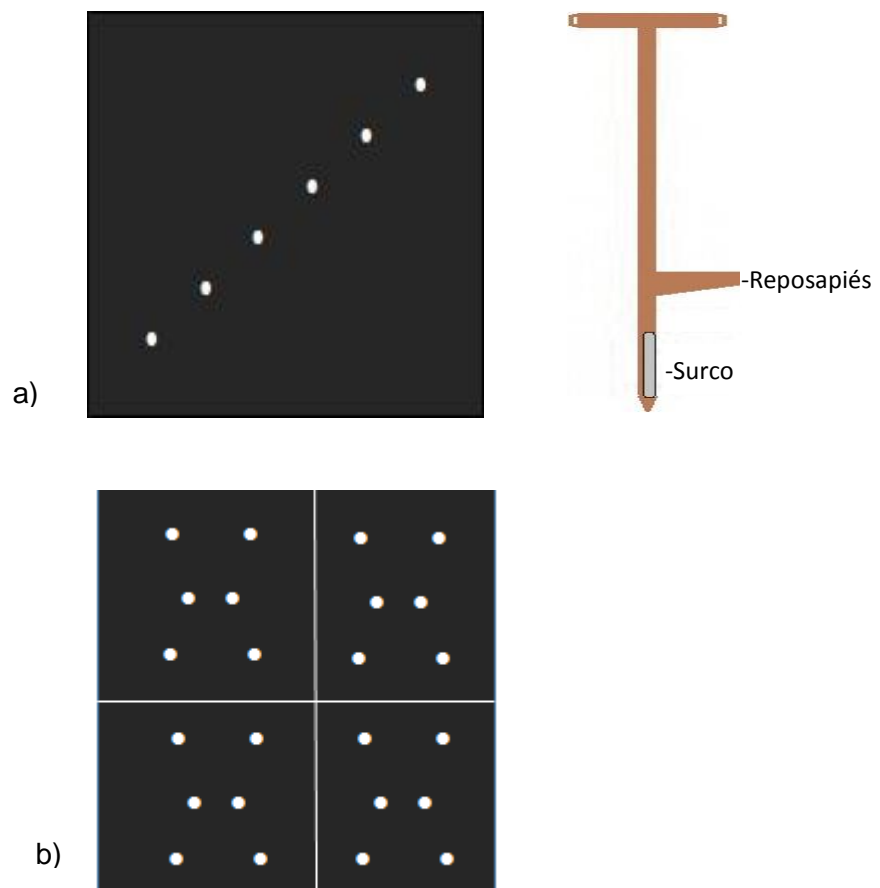


Figura 12. Esquemas de muestreo utilizados
a) Paisaje edáfico; b) Campos específicos
Fuente: Chacón-Iznaga (2014)



Figura 13. Plantación de boniato (*I. batatas*) perteneciente a la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú del municipio Santa Clara, provincia Villa Clara

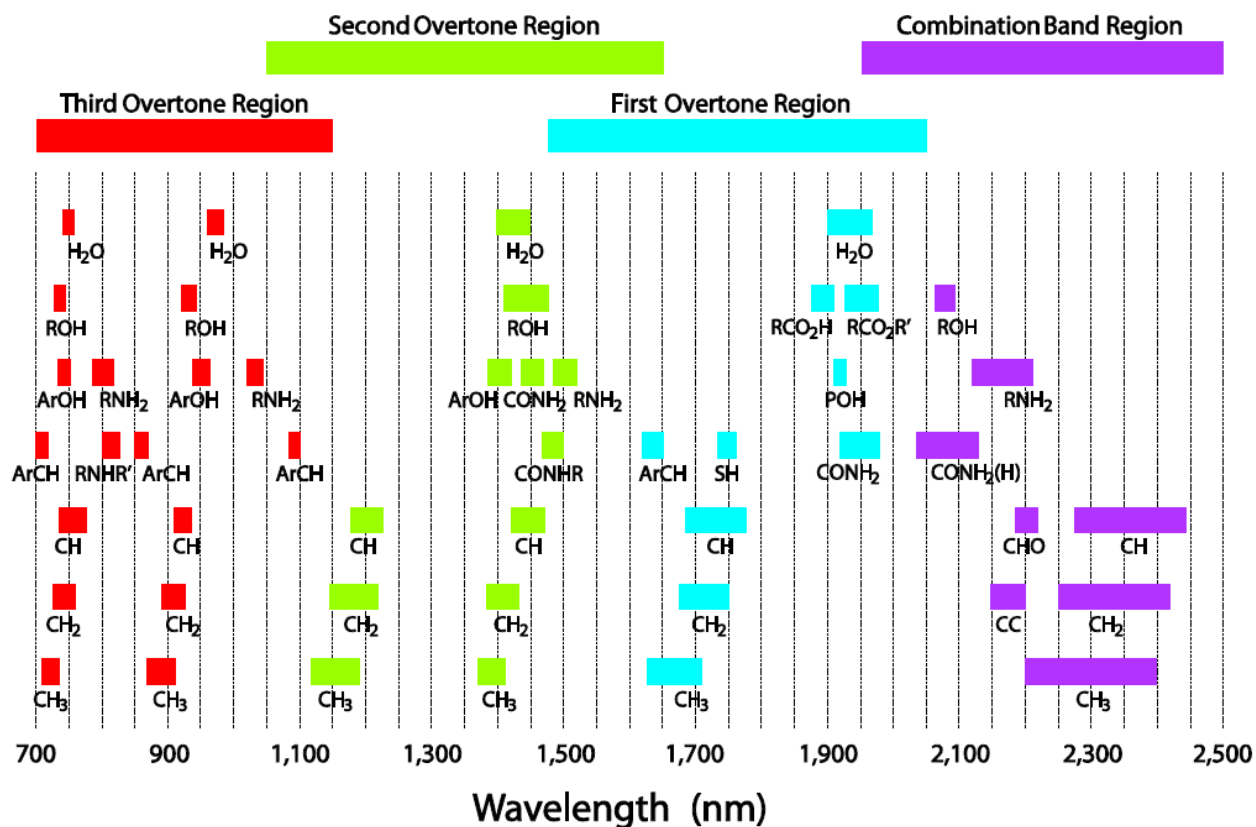


Figura 14. Asignación de bandas NIR a grupos orgánicos.