

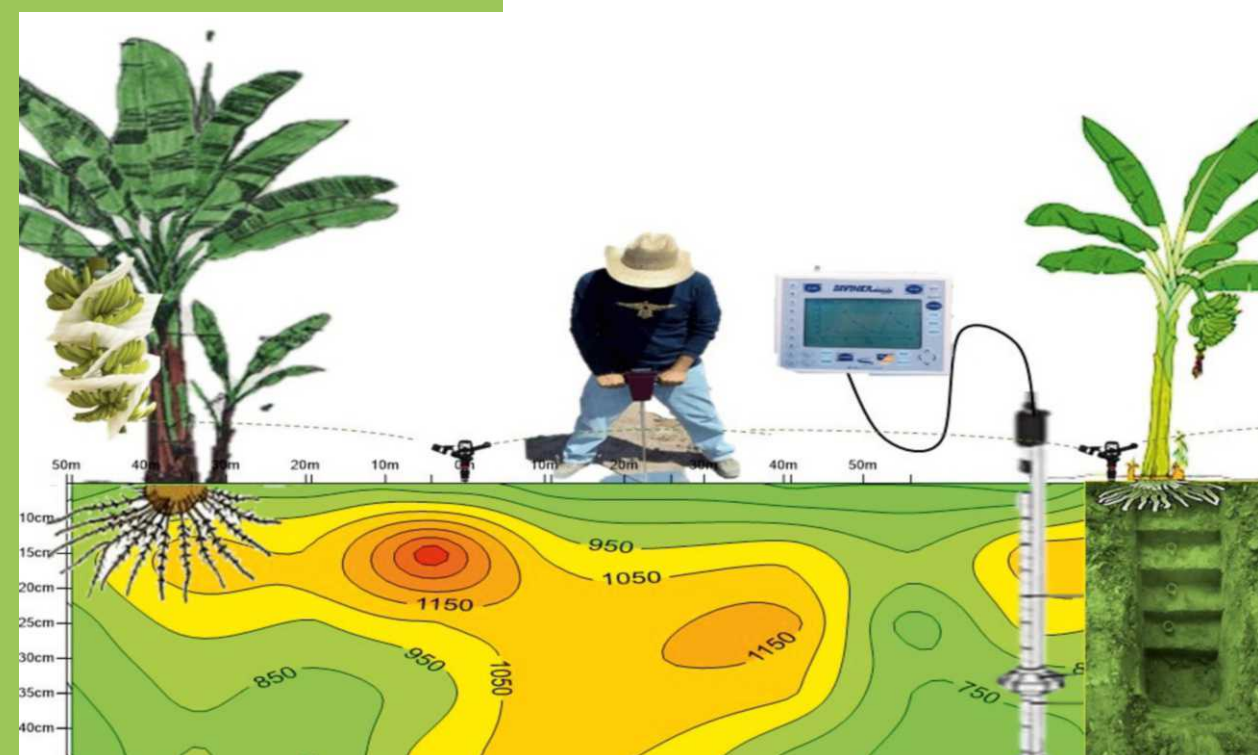


EFFECTO DE MEJORADORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS BANANEROS BAJO SISTEMAS DE RIEGO
JULIO ENRIQUE CHABLA CARRILLO



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

EFFECTO DE MEJORADORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS BANANEROS BAJO SISTEMAS DE RIEGO



JULIO ENRIQUE CHABLA CARRILLO

Año 2018

Efecto de mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación de suelos bananeros bajo sistemas de riego

Autor: Julio Enrique Chabla Carrillo

Tesis doctoral UDC / Año 2017

Directores: Marcos Lado Liñares

Eva Vidal Vázquez

Tutor: Marcos Lado Liñares

Programa de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal



UNIVERSIDADE DA CORUÑA





Programa Oficial de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal

Tesis Doctoral

Efecto de mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación de suelos bananeros bajo sistemas de riego

Julio Enrique Chabla Carrillo

Octubre 2017





Dña. Eva VIDAL VÁZQUEZ, Profesora Contratada Doctora del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de A Coruña (UDC) y **D. Marcos LADO LIÑARES**, Profesor Contratado Doctor del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de A Coruña (UDC)

CERTIFICAN

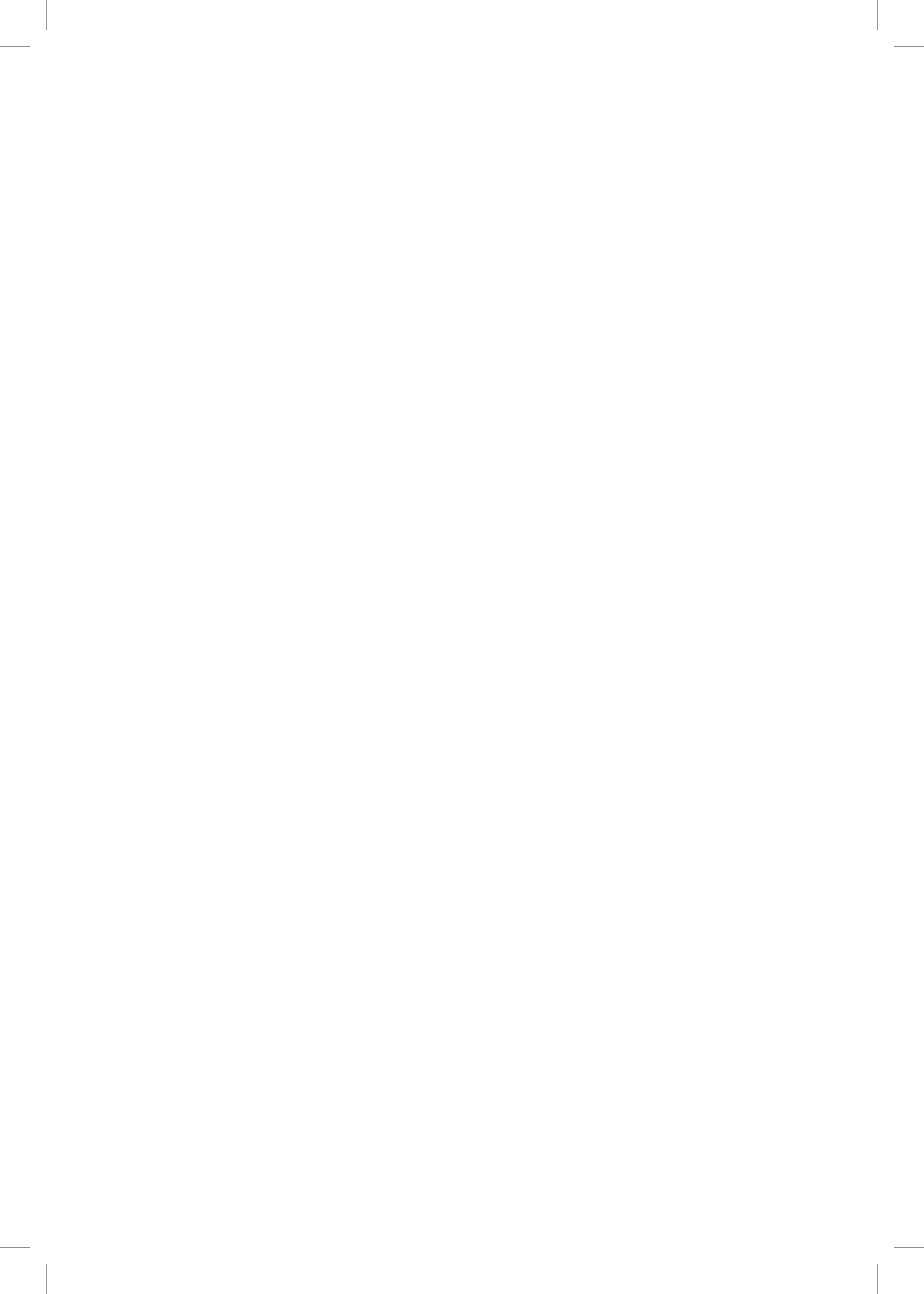
Que la presente memoria titulada “*Efecto de mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación de suelos bananeros bajo sistemas de riego*”, que para optar al grado de Doctor por la Universidad de A Coruña presenta **D. Julio Enrique CHABLA CARRILLO**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del Programa Oficial de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal.

Considerando que constituye trabajo de Tesis Doctoral, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, firmamos el presente certificado en A Coruña, a 3 de octubre de 2017.

Fdo.: Eva Vidal Vázquez

Fdo.: Marcos Lado Liñares



A mi esposa Fanny Jaramillo Solano (†)

A mi hijo Julio Fabriccio

Por su motivación, cariño y comprensión

A mis Padres (†) y hermanos

Por el apoyo incondicional.

A ellos

Les DEDICO



AGRADECIMIENTOS

Este estudio no hubiese sido posible llegar a un buen final sin la ayuda, orientaciones y colaboración de muchas personas. Que estas líneas sirvan para testimoniar mi sincero y profundo agradecimiento

Al Dr. Antonio Paz González, por su predisposición permanente y guía constante en el trabajo de tesis y su presta colaboración en todo momento.

A los directores de mi tesis doctoral Dra. Eva Vidal Vázquez, Dr. Marcos Lado Liñares, por su constante apoyo en el desarrollo de esta investigación, por sus oportunas sugerencias, guía y motivación.

Al personal del laboratorio de Edafología de la Universidad de A Coruña, de la Universidad de Loja y al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Unidad Académica de Ingeniería Civil de la Universidad de Machala.

Al personal de los laboratorios de los Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de A Coruña, por la estancia y por su presta colaboración en los análisis de suelo.

Al Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), de la Universidad de A Coruña por su apoyo a la estancia en nuestro trabajo de investigación.

Al Dr. Aitor García Tomillo, a los Ing. Agron. Pablo Villa y Miguel Bustamante por su apoyo brindado en los trabajos de campo, laboratorio y oficina.

A los propietarios de las tres fincas donde se desarrollaron los trabajos de campo, mi gratitud por su valioso apoyo.



RESUMEN

La compactación, considerada como el enemigo oculto del agricultor, es causa del deterioro del suelo, ya que provoca la pérdida de porosidad y el endurecimiento de los horizontes superficiales. El objetivo general de este trabajo es evaluar la compactación del suelo bajo sistemas de riego presurizados, y la medición de la efectividad de mejoradores físicos, químicos y biológicos para revertir la degradación y mejorar los suelos del Cantón Machala, Ecuador. El estudio se realizó entre mayo 2015 y abril 2017 en tres fincas, con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar, tomándose un total de 360 muestras de suelo. Los tratamientos fueron: testigo, aplicación de yeso, roturación y cobertura vegetal. Se determinaron las propiedades físicas, materia orgánica, superficie específica (SE) y se correlacionaron con los contenidos de humedad a bajos potenciales hídricos de la curva de retención. Se determinó la evolución del contenido de humedad en el campo mediante una sonda de reflectometría en el dominio de frecuencia (FDR), y el Intervalo Hídrico óptimo (IHO) considerando cinco niveles de compactación con densidades de 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; y 1,5 g cm⁻³. Además, se efectuó un ensayo de compactación inducida en laboratorio para determinar la densidad de suelo crítica (DSC) y el grado de humedad óptimo, estableciendo que las curvas de compactación inducida que tienen pendiente ligera correspondieron a suelos resistentes a la compactación. Se construyeron curvas de retención de humedad (CRH) obtenidas a través de las ollas de presión y membrana de Richards. Se midió la resistencia a la penetración antes y después de los tratamientos, observándose un descenso de los valores de esta propiedad, por efecto de los tratamientos o por las precipitaciones. La intensidad pluviométrica (12,7mm h⁻¹) > velocidad infiltración 2,8mm h⁻¹) sugiere que el riego por aspersión suprafoliar tiende a producir el sellamiento y encostramiento del suelo en capas superiores. Se determinó el coeficiente de uniformidad (CU), distribución de uniformidad (DU) y el coeficiente de variación (CV) de la aplicación del riego, y se observó una alta variabilidad, y por tanto, una mala distribución de la lámina de agua. Se calculó el índice de grosor de gotas de agua de riego, obteniéndose valores de 3,5, que se evaluaron como muy gruesas en el riego suprafoliar. Se determinó el índice de estabilidad estructural (<5), y de encostramiento (1,96) de los suelos, concluyendo que son suelos degradados o con riesgo a la degradación. El tratamiento que mejora la compactación con mayor efectividad, medida empleando la resistencia a la penetración, es la roturación (506,9KPa), seguido del yeso

(554,7KPa) cuyo efecto se evidenció a los 90 días, y finalmente la cobertura vegetal (790,5KPa).

Palabras clave: compactación, roturación, reflectometría en el dominio de frecuencia (FDR), sellamiento, encostramiento, Intervalo Hídrico Óptimo (IHO), densidad de suelo crítica (DSC).

RESUMO

A compactación, considerada como o inimigo oculto do agricultor, provoca o deterioro do solo, unha perda de porosidade e o endurecemento dos horizontes superficiais. O obxectivo xeral do presente estudo é avaliar a compactación do solo baixo sistemas de irrigación presurizados, usando melloradores físicos, químicos e biolóxicos e medindo a súa eficacia na mellora dos solos do Cantón Machala, en Ecuador. O estudo foi realizado entre maio de 2015 e abril de 2017, en tres explotacións con sistemas de irrigación subfoliar e suprafoliar, obtendo un total de 360 mostras de solo. Os tratamentos foron: control, aplicación de xeso, roturación e cuberta vexetal. Determináronse as propiedades físicas, materia orgánica, superficie específica (SE), e correlacionouse co contido de humidade en potenciais hídricos baixo da curva de retención. O contido de humidade foi determinado por reflectometría magnética (FDR) ademáis do Intervalo Hídrico Óptimo (IHO), considerando cinco niveis de compactación con densidades de 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; e 1,5 g cm⁻³. No laboratorio levouse a cabo un ensaio de compactación inducida para determinar a densidade crítica solo (DSC) e o grao de humidade óptimo definindo que as curvas de compactación inducida con lixeira pendente correspondían a solos resistentes á compactación. Ademais, obtivéronse curvas de retención de humidade (CRH) mediante ola de presión e membrana de Richards. A resistencia á penetración foi medida antes e despois dos tratamentos, decrecendo os valores, ou por efecto dos mesmos ou polas precipitacións. A intensidade de precipitación (12,7mm h⁻¹ > velocidade de infiltración 2,8mm h⁻¹) suxire que a irrigación por aspersion suprafoliar tende a producir a formación de costras e o selado do solo nas capas superiores. Por outra banda, foi determinado o coeficiente de uniformidade (UC), distribución de uniformidade (DU) e o coeficiente de variación (CV), que obtiveron unha elevada variabilidade indicando, polo tanto, unha mala distribución da lámina de auga. Tamén se calculou o índice de grosor de gotas obténdose un valor de 3,5 que foi avaliada como moi grosa no rego suprafoliar. Respecto ao Índice de estabilidade estrutural (<5) e de encostramento (1,96), pódese concluir que se trata de solos degradados, ou con risco de degradación. O tratamento que mellor responde á compactación, segundo a resistencia á penetración, é a roturación (506,9 KPa), seguido do xeso (554,7 KPa) cuxo efecto foi evidenciado aos 90 días, e a cuberta vexetal (790,5 KPa).

Palabras clave: compactación, roturación, reflectometría no dominio da frecuencia (FDR), selado, encostramento, Intervalo Hídrico Óptimo (IHO), densidade do solo crítica (DSC).

ABSTRACT

Compaction, considered as the hidden enemy of the farmer, causes soil degradation, since it results in a loss of soil porosity and the hardening of upper soil horizons. The general objective of this work was to analyze soil compaction under pressurized irrigation systems, and the effectiveness of physical, chemical and biological treatments to ameliorate soils condition in Machala city, Ecuador. The study was conducted from May 2015 to April 2017 on three farms with subfoliar and suprafoliar irrigation systems. A total number of 360 soil samples were collected and analyzed. In each irrigation system, the tested treatments were: control, gypsum applied on soil surface, tilling, and the establishment of a vegetation cover. Organic matter content and several physical properties, including specific surface (SS), were measured and correlated with moisture contents at low water potentials of the retention curve. Moisture content was measured using frequency domain reflectometry (FDR) probes; optimal hydric interval (OHI) was determined at 5 levels of compaction with bulk densities of 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; and 1.5 g cm⁻³. Laboratory compaction tests were used to determine soil critical density (SCD) and optimal water content, which showed that soils resistant to compaction had compaction curves with low slope. Water retention curves (WRC) were determined using Richards apparatus. Penetration resistance was lower after the different treatments, probably due to their ameliorating effect on soil structure or by the effect of precipitation. The evolution of infiltration rate (irrigation rate 12.7 mm.h⁻¹ > soil infiltration rate 2.8mm.h⁻¹) suggests that suprafoliar irrigation tends to produce soil sealing and crusting in the upper layers. Uniformity coefficient (CU), distribution of uniformity (DU) and coefficient of variation (CV) of applied irrigation showed high variability, indicating a poor distribution of water. Thickness of water drops (3.5) was considered as very big in the suprafoliar irrigation system. Structural stability index (<5), and crusting index (1.96) indicated that these soils are degraded soils or at risk of degradation. The most effective treatment to alleviate soil compaction was tilling (506,9KPa), followed by gypsum (554,7KPa), whose effect was evidenced after 90 days, and finally the establishment of a vegetable cover (790,5KPa).

Key words: compaction, tilling, frequency domain reflectometry (FDR), sealing, crusting, optimum water interval (IHO), critical soil density (DSC).



INDICE GENERAL

1.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Localización y problema bananero.....	1
1.2 Clima.....	4
1.2.1 Régimen térmico.....	5
1.2.2 Régimen Hídrico.....	6
1.2.3 Balance hídrico.....	6
1.3 Suelos.....	7
1.3.1 Propiedades físicas del suelo impactadas por el manejo del cultivo.....	9
1.3.2 Relación con otras propiedades físicas, mecánicas e hídricas.....	14
1.3.3 Compactación del suelo.....	15
1.3.3.1 Factores que inciden en la compactación del suelo.....	15
1.3.3.2 Compactación superficial y profunda.....	17
1.3.3.3 Evaluación de la compactación.....	18
1.4 Retención del agua en el suelo.....	20
1.4.1 Potencial del agua en el suelo.....	20
1.4.1.1 Potencial matricial (Ψ_m).....	21
1.4.1.2 Potencial gravimétrico (Ψ_g).....	21
1.4.1.3 Potencial osmótico (Ψ_o).....	21
1.4.1.4 Potencial de presión (Ψ_p).....	22
1.4.2 Contenido del agua en el suelo.....	22
1.4.3 Determinación del contenido de humedad del suelo.....	23
1.4.3.1 Medición directa del contenido hídrico del suelo.....	23
1.4.3.2 Mediciones indirectas del contenido hídrico del suelo.....	24
A. Tensiómetros.....	24
B. Reflectometría de dominios magnéticos temporales (TDR).....	25
C. Reflectometría de dominios magnéticos de frecuencia (FDR).....	26

1.4.4	Curvas de retención de humedad	28
1.4.5	Intervalo hídrico óptimo (IHO)	28
1.5	Medidas que ayudan a enfrentar el problema de la compactación.	31
1.5.1	Mejoradores físicos	31
1.5.2	Mejoradores químicos	31
1.5.3	Mejoradores biológicos	33
1.6	Evaluación de los sistemas de riego presurizado	35
1.6.1	La energía de impacto de la lluvia que producen los sistemas de riego presurizados	35
1.6.2	Velocidad de salida y tamaño de las gotas	36
1.6.3	Presión, descarga y grado de pulverización del chorro de salida del aspersor.	37
1.7	Condiciones agro-técnicas del cultivo de banano.....	38
2.	OBJETIVOS.....	41
2.1	Objetivo General	41
2.2	Objetivos Específicos	41
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1	Ubicación geográfica del área de ensayo.....	43
3.2	Descripción de las áreas de ensayo	43
3.3	Propiedades generales de los suelos de las fincas seleccionadas.	47
3.3.1	Análisis físico del suelo	47
3.3.1.1	Textura	47
3.3.1.2	Densidad aparente (da).....	48
3.3.1.3	Densidad Real (dr)	48
3.3.1.4	Porosidad Total (%)	49
3.3.1.5	composición textural y coloides del suelo de las fincas.....	49
3.3.2	Análisis Químico del suelo	50
3.3.2.1	pH del suelo.....	50

3.3.2.2 contenido de carbono orgánico	50
3.3.2.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	51
3.3.3. Análisis del Agua del riego	52
3.3.4 Superficie específica del suelo (SE).....	53
3.4 Contenido de humedad.....	55
3.4.1 Constantes hidrofísicas.....	55
3.4.2 Intervalo hídrico óptimo (IHO).....	56
3.4.3 Determinación del contenido de humedad a través de la sonda de capacitancia (FDR)	58
3.4.4 Tensiómetros	61
3.5 Resistencia a la penetración en el suelo (RMP)	61
3.6 Índice de encostramiento.....	62
3.7 Índice de estabilidad estructural.....	62
3.8 Ensayos de compactación inducida en laboratorio (Pruebas Proctor)	63
3.9 Pruebas de infiltración.....	64
3.10 Mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación del suelo.....	67
3.10.1 Mejoradores físicos	67
3.10.2 Mejoradores químicos.....	67
3.10.3 Mejoradores biológicos.....	68
3.11 Evaluación de los sistemas de riego presurizados.....	68
3.11.1 Intensidad pluviométrica (Ip).....	68
3.11.2 Uniformidad de distribución (DU).....	69
3.11.3 Coeficiente de uniformidad (CU).....	69
3.11.4 Determinación del coeficiente de variación de la descarga de los aspersores (CV)	71
3.11.5 Evaluación del índice de grosor de la gota (IG).....	71
3.11.6 Energía cinética de las gotas emitida por un aspersor.....	72
3.12 Diseño experimental.....	72

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
4.1 Textura	75
4.2 Densidad aparente	78
4.3 Densidad Real (g.cm³)	80
4.4 Porosidad de los suelos	82
4.5. Porosidad de aireación (%)	84
4.6 Superficie Específica (SE), BET- N₂ en los perfiles de los suelos de las fincas con sistemas de riego presurizado.	86
4.7 Contenidos de humedad.	90
4.8 Contenidos de humedad obtenidos por la sonda de refractometria de dominios magnéticos (FDR)	93
4.8.1 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca el Cisne.	93
4.8.2 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca La Fátima.	95
4.8.3 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca El Carmen.	97
4.8.4 Contenidos de humedad medida (%), medido a través de la sonda FDR en un perfil de suelo de 70 cm, fincas con sistema de riego presurizados.	100
4.9 Curvas de retención de humedad	102
4.10. Intervalo Hídrico Óptimo (IHO)	104
4.11 Resistencia a la penetración (RPS).	108
4.11.1 Propiedades físicas y la resistencia a la penetración del suelo (RPS).....	111
4.11.2 Resultado de la estadística descriptiva y matriz de correlación de las propiedades físicas y la RPS.	112
4.12 Compactación inducida de suelos en laboratorio. Prueba Proctor.	114
4.12.1 Densidad de suelo crítica (g.cm ⁻³) y contenido de humedad optima en finca con sistema de riego suprafoliar, con o sin cobertura vegetal.	115

4.12.2 Densidad de suelo crítica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y contenido de humedad optima en finca con sistema de riego subfoliar, con o sin cobertura vegetal.	116
4.13 Índice de encostramiento y estabilidad estructural de los suelos	118
4.14 Infiltración del agua en el suelo.	119
4.15 Evaluación de los sistemas de riego en las fincas de estudio.	122
4.15.1 Intensidad pluviométrica de los sistema de riego subfoliar y suprafoliar.	122
4.15.2 Coeficiente de uniformidad, uniformidad de distribución y coeficiente de variación de la descarga de los aspersores.	123
4.15.3 Curva radial de descarga de los aspersores utilizados en riego subfoliar y suprafoliar en las fincas.	124
4.15.4 Índice de grosor de gotas de la descarga del aspersor.	125
4.16 Efecto de mejoradores físico, químico y biológico en la compactación en suelos bananeros.....	126
4.16.1 Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar.	126
4.16.2 Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar.	128
4.16.3 Efecto de los mejoradores en la densidad real del suelo en fincas con sistema de riego subfoliar.	130
4.16.4 Efecto de los mejoradores en la densidad real del suelo, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	132
4.16.5 Efecto de los mejoradores en porcentaje de materia orgánica del suelo en fincas (%), con sistema de riego subfoliar.	134
4.16.6 Efecto de los mejoradores en porcentaje de materia orgánica del suelo en fincas (%), con sistema de riego suprafoliar.	136
4.16.7 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo, en fincas con sistema de riego subfoliar.	138
4.16.8 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo (%), en fincas con sistema de riego suprafoliar.	140

4.16.9 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo (%), en fincas con sistema de riego suprafoliar.	143
4.16.10 Efecto de los mejoradores en la Resistencia del suelo, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	145
5. CONCLUSIONES	149
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
7. ANEXOS	169

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población económicamente activa en la provincia de El Oro 2007-2008.	2
Tabla 2. Exportaciones de banano de Ecuador por volumen (cajas), año 2011.	4
Tabla 3. Características físicas y químicas del perfil de las fincas.	8
Tabla 4. Localización de las fincas a estudiar.	43
Tabla 5. Composición textural y coloides del suelo de las fincas de investigación.	49
Tabla 6. Composición química de los suelos de las fincas de investigación.	51
Tabla 7. Propiedades químicas del agua de riego de las fincas en estudio.	52
Tabla 8. Valores referenciales de superficie específica y CIC.	55
Tabla 9. Escala de interpretación de la resistencia a la penetración de la capa edáfica.	62
Tabla 10. Índice de estabilidad estructural (IEE).	63
Tabla 11. Rangos de infiltración básica según la textura.	66
Tabla 12. Valores de UD y CU para ciertas características de los cultivos.	70
Tabla 13. Valores referenciales de CU. y UD, para varios sistemas de aspersión.	70
Tabla 14. Rango de coeficiente de variación y su interpretación.	71
Tabla 15. Composición textural de los suelos en sus diversas capas con los sistemas de riego subfoliar, en las áreas de investigación.	76
Tabla 16. Composición textural de los suelos en sus diversas capas con los sistemas de riego suprafoliar, en las áreas de investigación.	76
Tabla 17. Densidad aparente (g.cm^{-3}) en el perfil de suelos, fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.	78
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente del suelo (g.cm^{-3}) en los perfiles de suelos, fincas con riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.	79
Tabla 19. Densidad real (g.cm^{-3}) en el perfil de suelos, fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.	80
Tabla 20. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad real del suelo (g.cm^{-3}) en los perfiles de suelos, fincas que tienen riegos presurizados, con y sin cobertura vegetal.	81
Tabla 21. Porosidad total (%) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.	83
Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) para la porosidad total del suelo (%) en los perfiles de suelos, en fincas que poseen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.	84
Tabla 23. Porosidad de aireación (%) en el perfil de suelo, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.	85

Tabla 24. Análisis de varianza (ANOVA) para la porosidad de aireación (%) del suelo en los perfiles de suelos, fincas que tienen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.....	85
Tabla 25. Superficie específica (m ² .g ⁻¹) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.....	86
Tabla 26. Análisis de varianza (ANOVA) de la superficie específica (m ² .g ⁻¹) en los perfiles de suelos, en fincas que poseen riegos presurizados, con y sin cobertura vegetal.	87
Tabla 27. Contenidos de humedad (%) a diferentes tensiones de la curva de retención versus la superficie específica (BET - m ² . g ⁻¹).....	89
Tabla 28. Porcentaje de humedad en el perfil de suelos (%), fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.....	91
Tabla 29. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de humedad del suelo del suelo en los perfiles de suelos, fincas que poseen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.	92
Tabla 30. Promedio de los contenidos de humedad (%), medido la sonda FDR en las 24 semanas de estudio, finca El Cisne.	93
Tabla 31. Comportamiento del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca El Cisne.	94
Tabla 32. Promedio de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca La Fátima.	95
Tabla 33. Comportamiento de la humedad (%), medido con la sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca La Fátima.	96
Tabla 34. Promedio general del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR en las 24 semanas de observación, finca El Carmen.	98
Tabla 35. Comportamiento de la humedad (%), en las 24 semanas de estudio, finca El Carmen.	99
Tabla 36. Contenidos de humedad en el perfil de suelos de las fincas (%), con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con o sin cobertura vegetal.....	100
Tabla 37. Análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de humedad en los perfiles de suelos, bajo sistemas de riegos presurizados	101
Tabla 38. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos con cobertura vegetal y riego suprafoliar. Finca El Cisne.	105
Tabla 39. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos con cobertura vegetal y riego subfoliar. Finca El Cisne.....	106

Tabla 40. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos sin cobertura vegetal, riego suprafoliar.	106
Tabla 41. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos sin cobertura vegetal, riego subfoliar.	107
Tabla 42. Resistencia a la penetración (KPa) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.	109
Tabla 43. Análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a la penetración del suelo (KPa) en los perfiles de suelos con incidencia de riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.	110
Tabla 44. Propiedades físicas de cinco estratos de 10 cm de un perfil de suelo de las fincas, con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar y cobertura vegetal.	112
Tabla 45. Resultados estadísticos descriptivos de las propiedades físicas de los suelos de las fincas con sistemas de riego suprafoliar, subfoliar con o sin cobertura vegetal a la profundidad de 0-50 cm (N=número de muestras).	112
Tabla 46. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas del suelo con sistema de riego suprafoliar, subfoliar, con y sin cobertura vegetal a la profundidad de 0-50 cm.	113
Tabla 47. Ensayos Proctor para suelos bananeros, con sistemas de riegos presurizados, bajo la aplicación de mejoradores. Cuadro de densidad crítica e contenido de humedad óptimo.	118
Tabla 48. Índice de estabilidad estructural (IEE) e índice de encostramiento (IE) de los suelos en fincas de estudios.	118
Tabla 49. Ecuaciones de la infiltración acumulada y velocidad de infiltración, de los suelos de las fincas (cm.minuto ⁻¹).	120
Tabla 50. Velocidad de Infiltración del suelo de las fincas, con sistemas de riego presurizado (mm.hora ⁻¹).	120
Tabla 51. Evaluación de los coeficientes de uniformidad (CU), variación (CV) y distribución de uniformidad (DU) de los sistemas de riego presurizados.	123
Tabla 52. Índice de grosor de gotas.	126
Tabla 53. Estadística descriptiva, del efecto de los mejoradores sobre la densidad aparente en fincas con sistema de riego subfoliar.	126
Tabla 54. Análisis de varianza, de la densidad aparente de los suelos por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	127
Tabla 55. Distribución de la densidad aparente en el perfil del suelo (g.cm ⁻³), por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.	127
Tabla 56. Estadística descriptiva de la densidad aparente de los suelos (g.cm ⁻³), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	128

Tabla 57. Análisis de varianza, de la densidad aparente de los suelos, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	129
Tabla 58. Distribución de la densidad aparente en el perfil del suelo (g.cm^{-3}), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.....	129
Tabla 59. Estadística descriptiva de la densidad real de los suelos (g.cm^{-3}), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	130
Tabla 60. Análisis de varianza, de los contenidos de la densidad real del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.....	131
Tabla 61. Distribución de la densidad real en el perfil del suelo (g.cm^{-3}), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	131
Tabla 62. Estadística descriptiva, de la densidad real de los suelos (g.cm^{-3}), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	132
Tabla 63. Análisis de varianza, de los valores de la densidad real del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	133
Tabla 64. Distribución de la densidad real en el perfil del suelo (g.cm^{-3}), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	133
Tabla 65. Estadística descriptiva, del contenido de materia orgánica, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	134
Tabla 66. Análisis de varianza de la distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.	135
Tabla 67. Distribución del contenido de materia orgánica, en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	136
Tabla 68. Estadística descriptiva, de los contenidos de materia orgánica, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar.....	137
Tabla 69. Análisis de varianza, de los contenidos de materia orgánica por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	137
Tabla 70. Distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	137
Tabla 71. Estadística descriptiva, de la porosidad total del suelo (%), por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego subfoliar.	139
Tabla 72. Análisis de varianza, de la porosidad total en el suelo, por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego subfoliar.	139
Tabla 73. Distribución de la porosidad total en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	139

Tabla 74. Estadística descriptiva de la porosidad total del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar	141
Tabla 75. Análisis de varianza de la porosidad total del suelo, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar	141
Tabla 76. Distribución de la porosidad total en el perfil del suelo (%), utilizando mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar.....	142
Tabla 77. Estadística descriptiva, de la resistencia a la penetración del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	143
Tabla 78. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	143
Tabla 79. Distribución de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	144
Tabla 80. Estadística descriptiva, de la resistencia de la penetración, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	145
Tabla 81. Distribución de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los productores en la provincia de El oro por tamaño de plantación año 2007 – 2008	1
Figura 2. Distribución de grupos de trabajadores.	3
Figura 3. Ingreso en millones de dólares por exportación de banano.....	3
Figura 4. Zonas climáticas de la provincia de El Oro.....	5
Figura 5. Zonas de temperaturas (isotermas) de la provincia de El Oro.	5
Figura 6. Zonas de precipitación (isoyetas) de la provincia de El Oro.....	6
Figura 7. Balace hídrico, para la ciudad de Machala.....	7
Figura 8. Taxonomía de suelos de la provincia de El Oro.....	7
Figura 9. Perfil típico de la las fincas	9
Figura 10. Localización espacial de las fincas con riego presurizado.	43
Figura 11. Sistema de riego suprafoliar y subfoliar con cobertura vegetal, y ubicación de las áreas experimentales. Finca El Cisne.....	44
Figura 12. Sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, y ubicación de las áreas experimentales. Finca El Carmen.	44
Figura 13. Sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, y ubicación de las áreas experimentales. Finca La Fátima.	45
Figura 14. Dimensiones de las áreas de muestreo en los riegos subfoliar y suprafoliar de las fincas.....	45
Figura 15. Detalles de calicata y muestreo.	47
Figura 16. Pruebas de constantes hidrofísicas, ollas de presión y membranas de Richards....	56
Figura 17. Toma de datos con la sonda FDR.....	59
Figura 18. Prueba Proctor en compactación inducida del suelo.	64
Figura 19. Pruebas de infiltración en campo.	66
Figura 20. Zonas de roturación con el subsolador manual (hércules).	67
Figura 21. Aplicación del sulfato de calcio ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).	67
Figura 22. Cobertura vegetal con Kudzu (<i>Pueraria phaseoloide</i>).	68
Figura 23. Prueba de intensidad pluviométrica (I_p).	69
Figura 24. Distribución del contenido mineral del suelo en un sistema de riego subfoliar, a) T0: Testigo, b) T1: Roturación, c) T2: Yeso agrícola, d) Cobertura vegetal.....	77
Figura 25. Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar con y sin cobertura vegetal.	79

Figura 26. Densidad real (g.cm^{-3}) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.	81
Figura 27. Porosidad total (%) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar con cobertura vegetal y sin cobertura vegetal.	83
Figura 28. Porcentaje de porosidad de aireación (%) de los suelos, fincas con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar en las áreas de ensayo.	86
Figura 29. Dinámica de la SE en el perfil del suelo en fincas con riego presurizado y cobertura vegetal.	88
Figura 30. Correlaciones de la superficie específica con los contenidos de humedad a diferentes tensiones: a) 15 bar, b) 0.33 bar, c) 0.1 bar y d) y en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad.	89
Figura 31. Análisis de regresión de la superficie específica con el contenido de arcilla.	90
Figura 32. Análisis de regresión de la superficie específica con el porcentaje de materia orgánica.	90
Figura 33. Regresión de la superficie específica con los contenidos de arcilla más limo.	90
Figura 34. Porcentaje de humedad del suelo en el perfil de suelos (%), fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con sin cobertura vegetal.	92
Figura 35. Comportamiento del contenido de humedad (%), en un perfil de suelo de 70 cm. Finca El Cisne.	94
Figura 36. Comportamiento de la humedad del suelo (%), en las 24 semanas de lectura. Finca El Cisne.	94
Figura 37. Comportamiento de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR en los suelos de la hacienda El Cisne.	95
Figura 38. Comportamiento del contenido de humedad (%), en un perfil de suelo de 70 cm. Finca La Fátima.	96
Figura 39. Comportamiento del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR, en las 24 semanas. Finca La Fátima.	97
Figura 40. Comportamiento de los contenidos de humedad en un perfil de suelo de 70 cm, medido con la sonda FDR, Finca La Fátima.	97
Figura 41. Comportamiento de la humedad (%), en un perfil de 70 cm de suelo.	99
Figura 42. Comportamiento de la humedad (%), medido.	99
Figura 43. Comportamiento de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR en los suelos de la Finca El Carmen.	100

Figura 44. Contenido de humedad (%) en el perfil de suelos con sistemas de riego de las tres fincas estudiada.	100
Figura 45. Comportamiento de la curva de humedad (%), durante las 24 semanas de estudio, en fincas de investigación.	101
Figura 46. Curvas de retención de humedad de las fincas; a) Finca El Cisne riego subfoliar con cobertura, b) Finca El Cisne con riego suprafoliar con cobertura, c) Finca La Fátima riego subfoliar sin cobertura d) Finca el Carmen, riego suprafoliar sin cobertura.	103
Figura 47. Representación gráfica del Intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca El Cisne, con cobertura vegetal y riego Suprafoliar.	105
Figura 48. Representación gráfica del Intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca El Cisne, con cobertura Vegetal y riego subfoliar.	106
Figura 49. Representación gráfica del intervalo hídrico óptimo de los suelos de la Finca El Carmen, sin cobertura vegetal y riego Suprafoliar.	107
Figura 50. Representación gráfica del intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca La Fátima, sin cobertura vegetal y riego subfoliar.	107
Figura 51. Resistencia a la penetración (KPa) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.	110
Figura 52. Densidad de suelo crítica en riego suprafoliar; a) Testigo (Finca El)	116
Figura 53. Densidad de suelo crítica, en riego subfoliar; a) Testigo (Finca La Fátima), b) Sulfato de calcio (Finca La Fátima), c) Roturación (Finca La Fátima) y d) Cobertura vegetal (Finca El Cisne).	117
Figura 54. a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	121
Figura 55. a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	121
Figura 56. a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.	121
Figura 57. a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.	122
Figura 58. Distribución de la intensidad pluviométrica; a) riego suprafoliar sin cobertura (finca El Carmen), b) riego suprafoliar con cobertura (finca El Cisne), c) riego subfoliar sin cobertura (finca La Fátima), d) riego subfoliar con cobertura (finca El Cisne).	123
Figura 59. Curva de descarga de un sistema de riego Suprafoliar.	125
Figura 60. Curva de descarga de un sistema de riego Subfoliar.	125

Figura 61. Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar.	128
Figura 62. Dinámica de la densidad aparente en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego suprafoliar.	130
Figura 63. Dinámica de la densidad real en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	132
Figura 64. Dinámica de la densidad real en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.	133
Figura 65. Dinámica del contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	136
Figura 66. Dinámica del contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego suprafoliar.	138
Figura 67. Dinámica de la Porosidad total en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.	140
Figura 68. Efecto de los mejoradores en la Resistencia del suelo, en fincas con sistema de riego subfoliar.	142
Figura 69. Dinámica de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.	144
Figura 70. Dinámica de la resistencia a la penetración (KPa) a los 90 días de la aplicación del yeso agrícola, por estrato, en sistema de riego subfoliar.	145
Figura 71. Dinámica de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), utilizando mejoradores en finca con un sistema de riego suprafoliar.	147
Figura 72. Dinámica de la resistencia a la penetración (Kpa) a los 90 días de la aplicación del yeso agrícola, por estrato, en sistema de riego suprafoliar.	147

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS DE TABLAS

Tabla A - 1. Valores de datos meteorológicos promedios de la estación Santa Inés – Machala, período 1989 -2010.	169
Tabla A -2. Calculo de la evapotranspiración potencial, método de Thorthwaite, Machala.	169
Tabla A -3. Balance Hídrico para la Estación Meteorológica Granja Sta. Inés, provincia de El Oro, cantón Machala.	169
Tabla A - 4. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego subfoliar, Finca El Cisne.	170
Tabla A - 5. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego suprafoliar, Finca El Cisne.	170
Tabla A - 6. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego subfoliar Finca La Fátima.	170
Tabla A -7. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego suprafoliar Finca El Carmen.	170
Tabla A - 8. Densidad aparente de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	171
Tabla A - 9. Densidad aparente de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	171
Tabla A - 10. Densidad aparente de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.	171
Tabla A -11. Densidad aparente de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.	172
Tabla A -12. Densidad real (g.cm ⁻³) de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.	172
Tabla A -13. Densidad real (g.cm ⁻³) de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.	172
Tabla A -14. Densidad real (g.cm ⁻³) de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.	173
Tabla A - 15. Densidad real (g.cm ⁻³) de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.	173

Tabla A -16. Porosidad total de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.	173
Tabla A -17. Porosidad total de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.	174
Tabla A -18. Porosidad total de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.	174
Tabla A -19. Porosidad total de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.	174
Tabla A -20. Porosidad de aireación de las fincas con riego presurizado con y sin cobertura, SPF –CC (suprafoliar con cobertura), SPF – SC (suprafoliar sin cobertura), SBF – CC (subfoliar con cobertura), SBF – SC (subfoliar sin cobertura).	175
Tabla A -21. Superficie específica (BET- m ² . g ⁻¹) de las fincas con riego presurizado con y sin cobertura, SPF –CC (suprafoliar con cobertura), SPF – SC (suprafoliar sin cobertura), SBF – CC (subfoliar con cobertura), SBF – SC (subfoliar sin cobertura).	175
Tabla A - 22. Humedad del suelo (%) con cobertura vegetal bajo un sistema de riego subfoliar. Finca El cisne.	175
Tabla A - 23. Humedad del suelo (%) con cobertura vegetal bajo un sistema de riego suprafoliar, Finca El cisne.	175
Tabla A - 24. Humedad del suelo (%) sin cobertura vegetal bajo un sistema de riego subfoliar, Finca La Fátima.	176
Tabla A - 25. Humedad del suelo (%) sin cobertura vegetal bajo un sistema de riego suprafoliar, Finca El Carmen.	176
Tabla A - 26. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 1.	176
Tabla A - 27. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 2.	177
Tabla A - 28. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 3.	177
Tabla A - 29. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 4.	177
Tabla A - 30. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 5.	178
Tabla A - 31. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 6.	178

Tabla A - 32. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 7.	178
Tabla A - 33. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 8.	179
Tabla A - 34. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 9.	179
Tabla A - 35. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 1.	179
Tabla A - 36. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 2.	179
Tabla A - 37. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 3.	180
Tabla A - 38. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 4.	180
Tabla A - 39. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 5.	180
Tabla A - 40. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 6.	180
Tabla A - 41. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 7.	181
Tabla A - 42. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 8.	181
Tabla A - 43. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 9.	181
Tabla A - 44. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 1.	181
Tabla A - 45. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 2.	182
Tabla A - 46. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 3.	182
Tabla A - 47. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 4.	182
Tabla A - 48. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 5.	182

Tabla A - 49. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 6.	183
Tabla A - 50. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 7.	183
Tabla A - 51. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 8.	183
Tabla A - 52. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 9.	183
Tabla A - 53. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	184
Tabla A - 54. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.	184
Tabla A - 55. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.....	184
Tabla A - 56. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.....	185
Tabla A - 57. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego subfoliar con cobertura Finca el Cisne.....	185
Tabla A - 58. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego suprafoliar con cobertura Finca el Cisne.	185
Tabla A - 59. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego suprafoliar sin cobertura Finca el Carmen.	186
Tabla A - 60. Datos para la determinación del IHO: porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego subfoliar sin cobertura Finca La Fátima.	186
Tabla A - 61. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Cisne, con cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar.	186
Tabla A - 62. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Cisne con cobertura vegetal y sistema de riego suprafoliar.	187
Tabla A - 63. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca La Fátima, sin cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar.	187

Tabla A - 64. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Carmen sin cobertura vegetal, bajo sistema de riego suprafoliar.....	187
Tabla A - 65. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento testigo, en finca con riego subfoliar	188
Tabla A - 66. Prueba Proctor, para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con sulfato de calcio, en finca con riego subfoliar.....	188
Tabla A - 67. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con roturación, en finca con riego subfoliar.	188
Tabla A - 68. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con cobertura vegetal, en finca con riego subfoliar.	188
Tabla A - 69. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento testigo, en finca con riego suprafoliar.	188
Tabla A - 70. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con sulfato de calcio, en finca con riego suprafoliar.	188
Tabla A - 71. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en tratamiento con roturación, en finca con riego suprafoliar.	188
Tabla A - 72. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con cobertura vegetal, en finca con riego suprafoliar.	189
Tabla A - 73. Infiltración instantánea de los suelos (cm.min ⁻¹), finca El Cisne con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	189
Tabla A - 74. Infiltración acumulada de los suelos (cm.min ⁻¹), finca El Cisne con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	189
Tabla A - 75. Infiltración instantánea de los suelos (cm.min ⁻¹), finca El Cisne con riego suprafoliar y cobertura vegetal.....	190
Tabla A - 76. Infiltración acumulada de los suelos (cm.min ⁻¹), finca El Cisne con riego suprafoliar con cobertura vegetal.....	190

Tabla A - 77. Infiltración instantánea de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca La Fátima con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	190
Tabla A - 78. Infiltración acumulada de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca La Fátima con riego subfoliar y sin cobertura vegetal.	191
Tabla A - 79. Infiltración instantánea de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) finca El Carmen con riego suprafoliar sin cobertura vegetal.	191
Tabla A - 80. Infiltración acumulada de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca El Carmen con riego suprafoliar sin cobertura.	191
Tabla A - 81. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.	192
Tabla A - 82. Intensidad pluviométrica registrada en finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	192
Tabla A - 83. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.	193
Tabla A - 84. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura vegetal.	194
Tabla A - 85. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad aparente del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), en finca con riego subfoliar.	195
Tabla A - 86. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad aparente del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), en finca con riego suprafoliar.	195
Tabla A - 87. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad real del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) en finca con riego subfoliar.	195
Tabla A - 88. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad real del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) en finca con riego suprafoliar.	195
Tabla A - 89. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la materia orgánica del suelo (%) en finca con riego subfoliar.	196
Tabla A - 90. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la materia orgánica del suelo (%) en finca con riego suprafoliar.	196
Tabla A - 91. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la porosidad total del suelo (%) en finca con riego subfoliar.	196
Tabla A - 92. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la porosidad total del suelo (%) en finca con riego suprafoliar.	196
Tabla A - 93. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la resistencia a la penetración del suelo (Kpa) en finca con riego subfoliar.	197

Tabla A - 94. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la resistencia a la penetración del suelo (Kpa) en finca con riego suprafoliar.....	197
Tabla A - 95. La superficie específica y los contenidos de arcilla, limo y materia orgánica.....	197
Tabla A - 96. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego suprafoliar con cobertura, Finca El Cisne.....	198
Tabla A - 97. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego suprafoliar sin cobertura, hacienda El Carmen.....	198
Tabla A - 98. Promedio de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego subfoliar con cobertura, Finca El Cisne.....	198
Tabla A - 99. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego subfoliar sin cobertura, finca La Fátima.....	198

ANEXO DE FIGURAS

Figura A - 1. Diagrama de la densidad aparente en relación con la textura del suelo.....	199
Figura A - 2. Ecuación potencial para la determinación de la ecuación de resistencia a la penetración expresada en $\text{cm}^{-3}\cdot\text{cm}^{-3}$, para la densidad de a)1.1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, b)1.2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,c)1.3 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,d)1.4 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,e)1.5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.	199
Figura A - 3. Isoterma de adsorción y desorción de N_2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.....	200
Figura A - 4. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N_2 , en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.	200
Figura A - 5. Isoterma de adsorción y desorción de N_2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.....	201
Figura A - 6. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N_2 , en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.	201
Figura A - 7. Isoterma de adsorción y desorción de N_2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.....	202
Figura A - 8. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N_2 , en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.	202
Figura A - 9. Isoterma de adsorción y desorción de N_2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.....	203
Figura A - 10. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N_2 , en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.	203
Figura A - 11. Isoterma de adsorción y desorción de N_2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.....	204

Figura A - 12. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.	204
Figura A - 13. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar con cobertura.	205
Figura A - 14. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar con cobertura, Finca El Cisne.	205
Figura A - 15. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.	206
Figura A - 16. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.	206
Figura A - 17. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.	207
Figura A - 18. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.	207
Figura A - 19. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.	208
Figura A - 20. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.	208
Figura A - 21. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.	209
Figura A - 22. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.	209

Figura A - 23. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	210
Figura A - 24. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N ₂ , en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.....	210
Figura A - 25. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	211
Figura A - 26. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N ₂ , en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.....	211
Figura A - 27. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	212
Figura A - 28. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N ₂ , en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.....	212
Figura A - 29. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	213
Figura A - 30. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N ₂ , en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.....	213
Figura A - 31. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.....	214
Figura A - 32. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N ₂ , en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.....	214
Figura A - 33. Isotherma de adsorción y desorción de N ₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.....	215

Figura A - 34. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.	215
Figura A - 35. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	216
Figura A - 36. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.	216
Figura A - 37. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	217
Figura A - 38. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.	217
Figura A - 39. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	218
Figura A - 40. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.	218
Figura A - 41. Isoterma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.	219
Figura A - 42. Linearizacion de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.	219

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Localización y problema bananero

La región que corresponde a la parte sur del Ecuador abarca las Provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, y comprende una superficie total de 27.491,84 Km² (INEC, 2010). El número de habitantes es 1.141.001, es decir, el 7.87% del total nacional: 65,73% corresponde a población urbana, 34,27% a la rural. El área tiene llanuras, cordilleras y parte de la Amazonia del Ecuador y sus suelos son variados, desde Entisoles en las llanuras hasta Inceptisoles en los sitios de mayores alturas. El Cantón Machala posee un gradiente altitudinal de alrededor de 6 msnm desde los sectores (Pj), (SI), (LI).

La producción mundial de banano en el año 2008 sumó 55 millones de toneladas, siendo los 10 principales productores India (20%), Brasil (11,5%), Ecuador y China (9% cada uno), Filipinas (6,5%), Indonesia (5,7%) y Costa Rica (3,8%). México, Tailandia y Colombia, producen porcentajes menores.

Un análisis realizado por la Subsecretaria Regional del Litoral, indica que en la Provincia de El Oro se encuentra el 46% de los productores de toda la producción nacional, distribuidos conforme se indica en la Fig. 1.

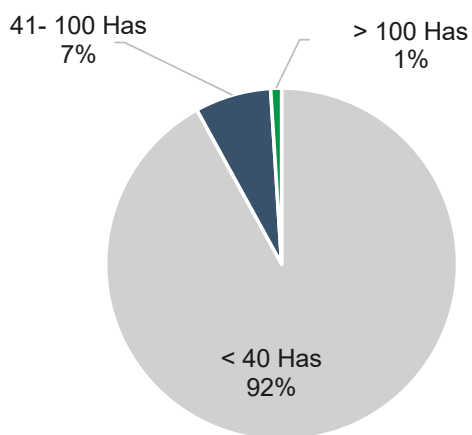


Figura 1. Distribución de los productores en la provincia de El Oro por tamaño de plantación (año 2007 – 2008).

La Provincia de El Oro, cuenta con un total de 559.846 habitantes y una extensión de 5.968 Km²; cuenta con una gran riqueza hidrográfica, lo que garantiza el recurso hídrico durante todo el desarrollo del ciclo vegetativo del banano.

Las previsiones de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) sobre el comercio mundial de banano son optimistas respecto al incremento del consumo a largo plazo por el valor nutricional de la fruta.

Las inversiones de 2008 en el área de producción de Ecuador alcanzaron un estimado de USD 4.000 millones de dólares entre plantaciones bananeras, infraestructura, empacadoras y puertos. A esto hay que sumar alrededor de 800 millones de dólares en industrias colaterales (cartoneras, plásticos, insumos, fumigación aérea), que totalizan más de USD 4.800 millones de dólares.

La superficie plantada en el país, según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), sumaba en el 2008 cerca de 195 mil hectáreas exclusivas y 39 mil hectáreas en asociación con otros productos. El banano del Ecuador es de excelente calidad, gracias a las condiciones del suelo, el clima tropical y las lluvias suficientes; la especialización de su gente para la producción y la exportación; los capitales disponibles para el cultivo; el alto nivel de la tecnología; los costos competitivos.

En la actividad trabajan más de 6 mil productores, de los cuales casi 4 mil tienen plantaciones de menos de 20 hectáreas. La producción nacional es de 6,6 millones de toneladas y las ventas llegan a 6,1 millones. Las provincias que más producen son: Los Ríos (36,5%), El Oro (31,6%) y Guayas (26,5%). Tiene un rendimiento por hectárea, mucho menor que el promedio centroamericano. La cadena productiva bananera es muy importante, porque da empleo directo a 270 mil personas e indirecto a 1,6 millones y su disponibilidad es permanente (Tabla 1) y Fig. 2.

Tabla 1. Población económicamente activa en la provincia de El Oro 2007-2008.

Tipo de trabajo que realizan	Porcentaje que representan
Trabajadores asociados	43,1
Trabajadores por cuenta propia	33,9
Trabajadores familiares no remunerados	3,8

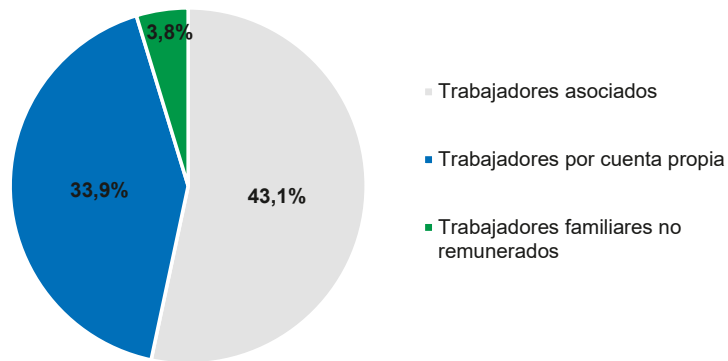


Figura 2. Distribución de grupos de trabajadores.

La exportación se realiza en cajas de cartón (de 43 o 22,68 libras) y en contenedores refrigerados, bajo muy exigentes normas sanitarias y de calidad para el “producto total”. Desde el año 2003 las exportaciones de este producto se mantienen firmemente sobre los mil millones de dólares anuales y desde el 2009 superan los 2 mil millones. El mejor año de exportación fue el 2011, en que sumó 2,24 mil millones de dólares, con un sorprendente incremento del 10% en relación con el año anterior que, a su vez, ya había crecido un poco frente al año 2009.

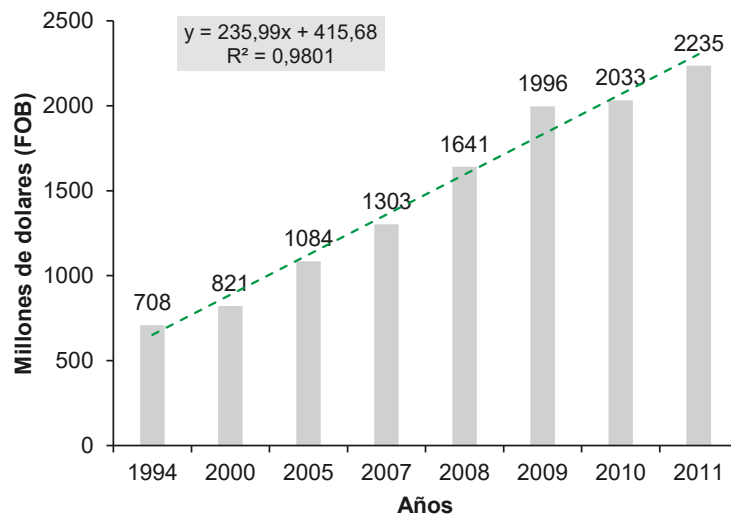


Figura 3. Ingreso en millones de dólares por exportación de banano.

En el año 2011 (Fig. 3), el sector bananero ecuatoriano exportó 284,6 millones de cajas, con ingresos por USD 2.235 millones de dólares y generó más de USD 90 millones de

dólares en impuestos fiscales, constituyendo uno de los principales contribuyentes al erario. Estas cifras representan el 32% del comercio mundial de banano (USD 7 mil millones). El banano ecuatoriano tiene muchos destinos. Los principales destinos del año 2011 fueron: los países Bálticos y Rusia, con alrededor de 23% cada uno; el Mediterráneo y Estados Unidos, con alrededor de 17% cada uno. Los otros destinos, entre ellos Europa del Este, el Cono Sur, el Medio Oriente, significaron en conjunto menos del 20% de las exportaciones (Tabla 2).

Tabla 2. Exportaciones de banano de Ecuador por volumen (cajas), año 2011.

Destino	2010	2011	2011 (%)	2011/10 (%)
Europa del Este	11.279.967	21.315.254	7,49	188,97
Medio Oriente	6.986.580	10.853.865	3,81	155,35
Rusia	53.354.962	64.467.416	22,65	120,83
Mar del Norte (países bálticos)	59.366.999	66.181.232	23,26	111,48
Cono sur	18.238.974	19.969.527	7,02	109,49
Mediterráneo	50.929.639	48.861.802	17,17	95,94
Oriente	2.434.896	2.240.338	0,79	92,01
Oceanía	1.335.552	1.185.156	0,42	88,74
Estados Unidos	56.206.029	48.577.597	17,07	86,43
África	5.434.250	945.362	0,33	17,4
TOTAL	265.587.828	284.587.549	100	107,15

Fuente: AEBE, <http://www.aebe.com.ec/data/files/DocumentosPDF/Estadísticas>

Siendo que el cultivo de banano genera fuente de trabajo directa e indirectamente a cerca de dos millones de personas, para mantener los niveles de exportación se han aumentado las áreas de cultivo, dado que en ciertos sectores ha comenzado a disminuir su producción por el mal manejo del cultivo y principalmente de los suelos. Buscando posibles soluciones, se construyeron canales de drenaje más profundos (disminuyendo áreas de producción) para drenar y compensar la falta de aireación y los problemas de compactación, pero sin una fundamentación en la investigación científica.

1.2 Clima

Según el sistema de clasificación de climas de Pourrut et al. (1995) esta área corresponde al clima tropical mega térmico seco a semi-húmedo cuyas principales características corresponden a un total pluviométrico anual comprendido entre 500 y 1.000 mm recogidos de

diciembre a mayo; la estación seca es muy marcada y posee una temperatura promedio anual de 24°C.

Los principales determinantes del clima son las corrientes cálidas de El Niño, provenientes del norte de América y que regularmente se presenta en los meses de diciembre a abril y las corrientes frías de Humboldt que vienen del sur de América presentes en los meses de junio a septiembre (Fig. 4).

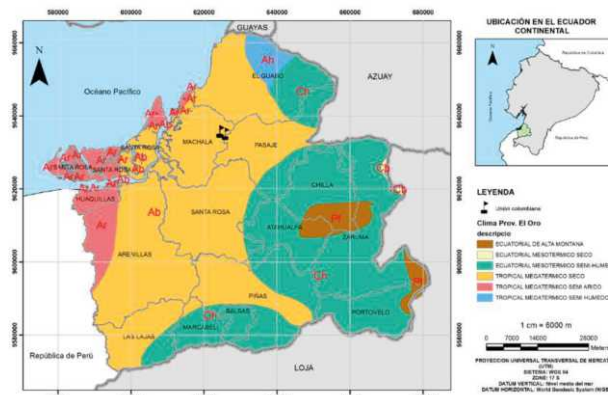


Figura 4. Zonas climáticas de la provincia de El Oro.
Fuente: Ministerio de Agricultura, Acuicultura, Ganadería y Pesca (MAGAP), 2013.

1.2.1 Régimen térmico

En base a los anuarios meteorológicos dados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), se tomaron las temperaturas promedio diarias y luego se obtuvieron los promedios anuales, observándose que sus promedios generales son de 24°C (Fig. 5).

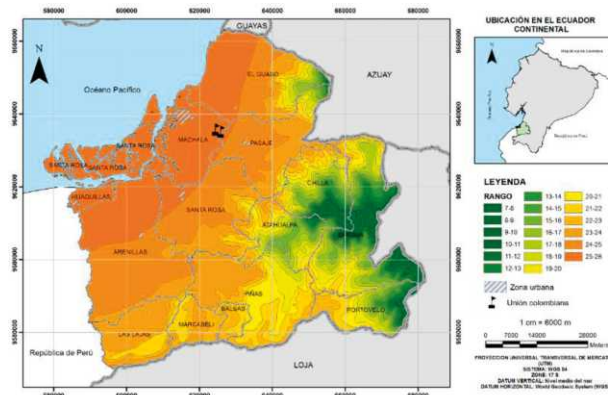
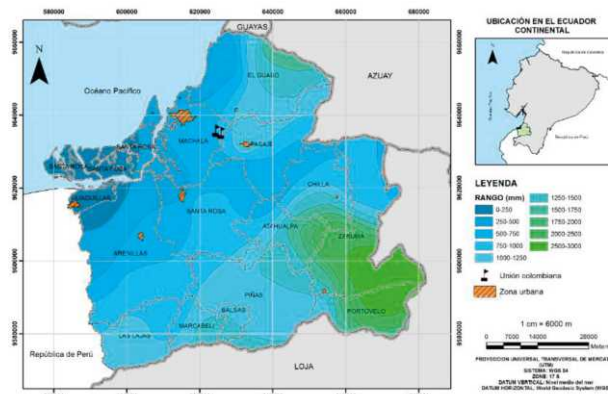


Figura 5. Zonas de temperaturas (isotermas) de la provincia de El Oro.
Fuente: Ministerio de Agricultura, Acuicultura, Ganadería y Pesca (MAGAP), 2013.

1.2.2 Régimen Hídrico

Las lluvias son muy variadas, presentándose las estaciones lluviosas generalmente desde finales de diciembre hasta abril, salvo casos excepcionales por la presencia de El Niño; la estación seca puede señalarse que es el resto del año, sin embargo, se presentan lloviznas ligeras de julio a septiembre (Fig. 6).



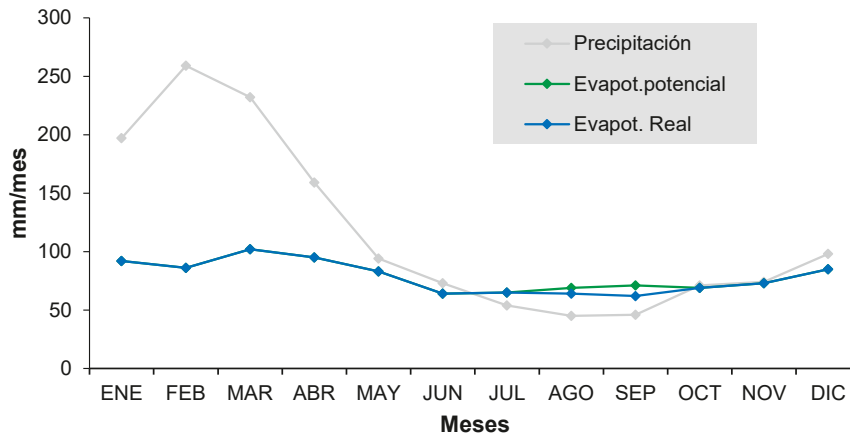


Figura 7. Balance hídrico, para la ciudad de Machala.

1.3 Suelos

De acuerdo al mapa de taxonomía de suelos del Atlas de la Provincia de El Oro (2014), en el transecto evaluado se encuentran órdenes de suelos que van desde los Entisoles en las llanuras aluviales hasta los Inceptisoles en los sitios de mayor altura a nivel del mar (Fig. 8).

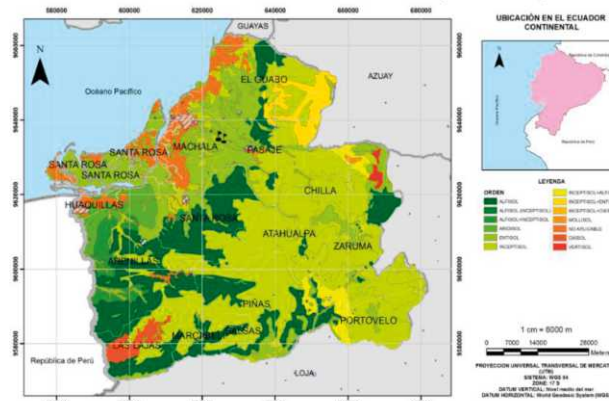


Figura 8. Taxonomía de suelos de la provincia de El Oro.
Fuente: Ministerio de Agricultura, Acuacultura, Ganadería y Pesca (MAGAP)

Según Baldock (1982) la zona de estudio corresponde a la Parroquia El Cambio, del Cantón Machala. Se caracteriza geomorfológicamente por llanuras cubiertas por material de origen aluvial de piedemonte y fluvial que sobreyace a depósitos del Cuaternario. Un estudio realizado por Orston (1983) definió que las formaciones litológicas de esta zona corresponden a llanuras costeras, caracterizadas por poseer una topografía plana a muy poco ondulada, permitiendo los depósitos aluviales del Río Jubones por el norte y hacia el sur por

el Río Motuche y al este por el Río Buenavista, sistemas fluviales que han generado la llanura de depósito fluvial de la Provincia de El Oro. Estos suelos han sido utilizados por más de medio siglo en plantaciones cacaoteras inicialmente y posteriormente en bananeras.

Los perfiles evaluados por Villaseñor (2015) en la llanura aluvial (PLIA-0001; PLIA-0002; PLIA 0017; PLIA-0008; PLIA-0005) presentan un epipedón antrópico, debido a la actividad bananera, sobre un endopedón cámbrico con una secuencia normal de los horizontes Ap-Bw-2C (Tabla 3). El epipedón, normalmente está modificado por actividades humanas, de manera que se reconoce como un horizonte Ap, de color pardo amarillento oscuro, con estructuras granulares y un grosor promedio de 20 cm, con mínimos de 18 cm y máximos de 25 cm. Los horizontes subsuperficiales (Bw) son de color pardo amarillento oscuro con moteados rojizos y una gran variación en el grosor. Los horizontes Bw denotan desarrollo estructural, escasa acumulación de arcillas y estructura en forma de bloques angulares; los 2C normalmente carecen de estructura y pertenecen a material generador no consolidado distinto al de las secuencias de horizontes Ap-Bw, considerándose como una discontinuidad litológica (Soil Survey Staff, 2010), factores concordantes con Arias et al, 2010. Los horizontes superficiales son muy variables, predominando las clases texturales franco limosa, franco arenosa y franco arcillo arenosa. En forma global estos suelos se denominan aluviales.

Tabla 3. Características físicas y químicas del perfil de las fincas.

Pedón (Código)	Horiz	Prof (cm)	Color húmedo	Textura (%)			Clase text. (USDA)	D. ap. (g.cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	C.E (dS/m)	M.O (%)
				Ar	Lim	Arc					
PLIA 0001 Machala Pajonal	Ap	0-25	10YR(4/4)	22,68	58	19,32	FL	1,41	7,46	0,13	0,44
	A	25-38	10YR(5/8)	38,68	60	1,32	FL	1,38	7,32	0,09	0,6
	Bw	38-63	10YR(5/6)	24,68	74	1,32	FL	1,14	7,13	0,17	0,24
	2C1	63-82	10YR(5/8)	48,68	50	1,32	FL	1,24	7,01	0,09	0,08
	2C2	82+	10YR(5/8)	72,68	24	3,32	a	1,25	7,01	0,09	0,44
PLIA 0002 Machala La Iberia	Ap	0-20	10YR(4/6)	22,46	74	3,54	FL	1,33	7,79	0,5	0,6
	A	20-32	10YR(5/8)	16,46	72	11,54	FL	1,3	7,83	0,34	0,32
	Bw	32-48	10YR(5/6)	16,46	82	1,54	FAL	1,17	7,9	0,44	0,36
	2C1	48-60	10YR(5/8)	16,46	44	39,54	FAL	1,16	7,78	0,46	0,24
	2C2	60-70	10YR(5/8)	16,46	42	41,54	AL	1,26	7,68	0,42	0,52
2C3	70+	10YR(5/8)	16,46	52	31,54	FAL	1,21	7,56	0,41	0,01	
PLIA 0017 Machala Sta. Inés	Ap	0-18	10YR(4/4)	34,24	64,57	1,19	A	1,64	6,8	0,26	2,2
	A	18-33	10YR(4/6)	38,24	60,22	1,54	FL	1,56	7,4	0,15	1,1
	Bw1	33-46	10YR(4/6)	40,46	58	1,54	FL	1,34	7,1	0,1	0,02
	Bw2	46-68	10YR(6/8)	42,46	56	1,54	FL	1,41	7,2	0,08	0,01
	2C	68+	10YR(4/8)	98,73	1,19	0,08	a	-	7,2	0,02	0,01



Figura 9. Perfil típico de la las fincas.

Estos suelos presentan altos contenidos de limo (Tabla 3) asociados al bajo contenido de materia orgánica. Las actividades agrícolas bananeras, acompañadas de humedad casi constante por los sistemas de riego presurizados, permiten que se forme encostramiento en las capas superficiales del suelo, destruyéndose la estructura y provocando la migración de las partículas más finas a capas inferiores (Fig. 9).

Zevallos (2006) añade que la infiltración del agua en el suelo en fincas bananeras con sistemas de riego presurizados se ve afectada, pues disminuye la permeabilidad de la capa superficial compactada, produciendo un incremento de la escorrentía y de la erosión. Además, si la capa compactada posee poca profundidad (alrededor de 20 cm) aparecerán problemas de encharcamiento al disminuir la velocidad de infiltración.

1.3.1 Propiedades físicas del suelo impactadas por el manejo del cultivo

La pérdida de calidad física del suelo puede ser evaluada por la alteración de algunas de las más importantes características físicas, como la densidad, la porosidad, la distribución del tamaño de poros, la estructura y la tasa de infiltración del agua en el suelo (FAO, 2000). Los suelos poseen naturalmente diferentes densidades debido a variaciones de la textura, de la porosidad y del contenido de materia orgánica; además, es un buen indicador del nivel de compactación (FAO, 2000; Gutiérrez et al., 1987).

La textura del suelo tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad de la humedad del mismo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la penetración por las raíces (FAO, 2000). Es el principal factor que afecta la retención del agua

en el suelo (Riquelme, 2004) pues ésta determina el área de contacto entre el agua y las partículas sólidas, ocasionando el arreglo de las partículas y la distribución de los poros (Cleudson, 2010).

Según la FAO (2000) los suelos poseen naturalmente diferentes densidades debido a variaciones de la textura, de la porosidad y del contenido de materia orgánica. Suelos franco - arenosos poseen una densidad aparente de $1,80 \text{ g.cm}^{-3}$ y una porosidad de 35 a 50%; mientras que suelos arcillosos presentan un valor de densidad de $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ y una porosidad de 40 a 60% (Archetr y Smith, 1972). Sin embargo, la densidad y la porosidad del suelo son características que pueden variar en función del tipo y de la intensidad de labranza. En estas condiciones, los suelos proporcionan la máxima disponibilidad del agua y por lo menos un 10% de espacio poroso.

Cleudson (2010) considera que el valor de la densidad aparente (D_a) puede ser usado como una medida directa del estado de compactación del suelo: los suelos compactados presentarán más masa por unidad de volumen. La densidad aparente se ha definido como un parámetro que da indicios de la presencia de zonas endurecidas y compactadas, ya que la reducción del espacio poroso presente en el suelo acarrea un aumento en el valor de la D_a (Herranz et al., 2000; Ramírez- López et al., 2008; Veronese Junior et al., 2006).

Según De Leenhur (1967) y De Boodt (1965) los suelos con un contenido de materia orgánica inferior al 1% poseen una densidad real inferior a $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$, mientras que en los suelos con contenido de arcillas, cuarzo, feldespato, calizas el valor de densidad real es de $2,5\text{-}3,0 \text{ g.cm}^{-3}$. Por otra parte, considerando que los componentes mayoritarios del suelo son aluminosilicatos y sílice cabe esperar unos valores de densidad entre $2,6\text{-}2,7 \text{ g.cm}^{-3}$, tomando como referencia un valor medio de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$.

La densidad real (D_r), está ligada con el tipo y cantidad de constituyentes minerales y orgánicos del suelo y la velocidad de cimentación de partículas en medios líquidos (Henaó, 2010; Orjuela- Malta et al., 2011). Esta propiedad física presenta una alta variabilidad, incluso en zonas consideradas como homogéneas. Mogollón (2010) indicó que la D_r depende del manejo cultural y composición mineral y orgánica del suelo. Estas dos propiedades físicas, juegan un rol importante en la porosidad total del suelo y, por consiguiente, en el movimiento y almacenaje del agua en el suelo (Cruz et al., 2010).

Jung et al. (2010) señalaron que en suelos arcillosos la Da, contenido de humedad y porosidad total pueden ser altamente variables tanto horizontal como verticalmente. La estructura puede ser evaluada por la distribución del tamaño de los poros, por la cantidad y estabilidad de los agregados. Suelos arenosos no forman agregados estables (como los arcillosos) siendo también llamados suelos de granos simples o sin estructura ya que su estructura es inestable y el suelo puede tornarse fácilmente compacto o poco permeable.

La estructura del suelo proporciona un armazón tridimensional ocupado por sólidos que dejan números espacios vacíos llamados poros. Las fuerzas que unen las partículas primarias dentro de los agregados son de naturaleza bastante débil, con lo cual pueden destruirse con relativa facilidad (Olalla, 1993). Fernández (1997) infiere que la estabilidad estructural es la capacidad del suelo para mantener el espacio poroso y su permanencia en el tiempo determina una estabilidad a la resistencia de la deformación, por acción de una carga externa y una estabilidad al agua, por efectos de la lluvia o de los sistemas de riego. La estabilidad puede disminuir conforme aumenta el tamaño de las unidades estructurales (Tisdall y Oades, 1982).

Otro de los aspectos que caracteriza la estructura es la resistencia mecánica, que depende de muchos procesos como la fragmentación de elementos estructurales debido a los periodos secos y húmedos, la compactación, la germinación de semillas y la exploración del suelo por las raíces. Al aumentar la humedad y el contenido en partículas coloidales (arcilla y humus), se originan fuerzas de cohesión mineral-mineral, mineral-orgánico, pudiendo ser por precipitaciones sílice, carbonatos de calcio, hidróxidos de Al y Fe.

Para tener en cuenta el efecto de la estructura sobre la compactación es necesario analizar las variables cuantitativas que caracterizan a los elementos estructurales o a los horizontes: densidad, volumen del espacio poroso, distribución y tamaño de poros, fisuras por unidad de superficie; y las variables cualitativas, que permiten describir la heterogeneidad del perfil y de su morfología.

Enríquez (2009), indica que la forma de los agregados en ciertos modelos estructurales incluye necesariamente espacios porosos. Aunque no sea considerada un factor de crecimiento para las plantas, la estructura del suelo ejerce influencia en el aporte de agua y de aire a las raíces, en la disponibilidad de nutrientes, en la penetración y desarrollo de la

macrofauna del suelo. Una buena calidad de la estructura significa buena calidad del espacio poroso, lo que permite la infiltración del agua y una buena distribución de raíces.

La FAO (2000) señala que la degradación de los suelos ocurre por la pérdida acentuada de la materia orgánica con fuerte daño de la estructura (colapso estructural). Estos suelos presentan encostramiento superficial y compactación subsuperficial, debido a que los poros han sido compactados hasta 0,2–0,3 cm de diámetro. Cleudson (2010) evaluaron la estructura mediante la distribución del tamaño de los poros, y por la cantidad y estabilidad de los agregados.

Otro factor a ser considerado en la evaluación de la calidad estructural del suelo es la densidad del mismo, que es afectada por el sistema de manejo del suelo alterando el espacio poroso, principalmente los macroporos e influyendo en las propiedades físicas – hídricas más importante del suelo, como la porosidad de aireación, la retención del agua en el suelo, la disponibilidad del agua para las plantas y la resistencia a la penetración (Klein, 2006).

Según la Comisión Nacional de Riego de Chile (2002) la compactación del suelo produce un aumento de la densidad aparente y la resistencia mecánica, destruye y debilita su estructuración provocando una disminución de la porosidad total del suelo y todo ello conlleva a un menor desarrollo del sistema radicular que afecta a la producción. Jung et al. (2010) señalan que los suelos con alto contenido de arcillas son más susceptibles a compactaciones superficiales a causa de fuerzas externas. La cohesión en suelos francos es inversamente proporcional al contenido de humedad del suelo, incidiendo así a los valores de la resistencia a la penetración, lo que concuerda a lo señalado por Hanza et al. (2005), que determinaron que el contenido de humedad del suelo es el factor más importante en los procesos de compactación.

El término "sellado del suelo" generalmente se refiere al desarrollo de una capa superficial de suelo con una reducción significativa en la porosidad y permeabilidad como resultado de un rápido humedecimiento del suelo seco, del impacto de las gotas de lluvia, depósito del material fino del suelo, dispersión química o alguna combinación de estos procesos (Awadhwal y Thierstein, 1985; Chartres y Geeves, 1998).

La formación de sellos y costras en suelos desnudos depende de factores internos como la granulometría, mineralogía de las arcillas, contenidos de materia orgánica, contenido de sesquióxidos y otros agentes cementantes, agentes dispersantes como Na^+ y Mg^{2+} intercambiables y del contenido de agua, además de factores externos como el clima (Pagliai, 2003; Wakindiki y Ben- Hur, 2002; Martínez-Gamiño y Walthall, 2000). Pagliai (2003) indica que los suelos más propensos al sellamiento son los de textura franca limosa y franco arcillosa, con contenidos de arena fina y muy fina, siendo los más susceptibles a esta degradación, los que tienen alto contenido de limo por ser fácilmente dispersables. Así mismo señala que las lluvias intensas, cuyas gotas son grandes y alcanzan altas energías cinéticas, tienen el potencial para producir sellado y encostramiento al igual que los sistemas de riego por aspersión.

El secado del suelo puede dar origen a una capa con una alta resistencia mecánica, la cual es comúnmente denominada "encostramiento o costra del suelo". Los sellos y costras del suelo no son otra cosa que una forma de degradación de la estructura del suelo superficial; no obstante, dado que ocurren en la interface suelo/atmósfera, ellos impactan significativamente el intercambio hídrico y gaseoso entre los dos medios e interfieren en la germinación y desarrollo de las plantas (Chartres y Geeves, 1998).

Los términos sellado y encostramiento del suelo, algunas veces usados como sinónimos, se refieren a cierto estado de compactación del suelo, ya que denotan una reducción en porosidad y un incremento en densidad. Muchos investigadores han establecido distinciones, asociando el encostramiento con el estado seco del suelo, mientras que el sellado está más relacionado con el estado húmedo del suelo (Gabriels et al., 1997).

Foth (1985) menciona que un suelo con una capa endurecida de arcilla en los primeros 100 cm, no es apropiado para drenar con tubos y que si éste estuviera en una pendiente sería más susceptible a la erosión. Zevallos (2006) añade a los problemas señalados, que la infiltración también se ve afectada pues disminuye la permeabilidad de la capa superficial compactada, produciendo un incremento de la escorrentía y de la erosión y si la capa compactada es a poca profundidad (alrededor de 20cm) aparecerán problemas de encharcamiento al disminuir la velocidad de infiltración.

La infiltración del agua en el suelo está relacionada con la estructura del mismo y su estabilidad (Fiorin, 2008), con la densidad y la porosidad del suelo y el sellado superficial (Ankeny et al., 1994), y con la cobertura y el contenido en carbono orgánico del suelo (Singh et al., 1994). La presencia de macroporos continuos, construidos por la lombriz de tierra y otros organismos, aumenta la capacidad de infiltración del agua en el suelo (Oka, 1988).

Uson et al. (2010) concluyeron que la porosidad es uno de los parámetros más útiles para evaluar el estado de compactación de un suelo. Cuando es muy baja afecta negativamente la aireación, la penetración radicular, la capacidad de infiltración del agua y el drenaje, manteniendo valores de 35-50% a 40-60% para suelos de textura arenosos a arcillosos, respectivamente. Es importante señalar que la densidad y porosidad varían en función del uso y manejo del suelo.

Florín (2008), indica que los cultivos requieren un mínimo del 10% de aireación para un desarrollo satisfactorio, especialmente los que no se adaptan a excesos de agua. La cantidad y la manera como los poros están distribuidos en el suelo afectan directamente a la infiltración del agua (Eltz et al., 1989), así como también a la capacidad de almacenamiento y el movimiento del agua en el suelo (Hell, 1980).

1.3.2 Relación con otras propiedades físicas, mecánicas e hídricas

Las propiedades físicas del suelo de las que depende en mayor medida el grado de degradación pueden resumirse en tres categorías.

1. La aptitud para asimilar el agua de lluvia o la generada por los sistemas de riego por aspersión, por infiltración y, por lo tanto, impedir o limitar su acumulación en la superficie o prevenir la formación de escorrentía.
2. La estabilidad estructural, es decir, la susceptibilidad del suelo al desprendimiento de partículas, que según Dexter (1977), crea un micro relieve que forma micro depresiones, que favorecen a la acumulación del agua de lluvia y por lo tanto puede considerarse un índice que permite caracterizar la estructura del suelo.
3. La evolución de la superficie de suelo es extremadamente compleja e intervienen numerosos procesos, determinados por las características de la lluvia, propiedades físicas, mecánicas e hídricas del suelo y factores de sitio como la cobertura vegetal y la propia evolución de la superficie, que conlleva una reducción de la permeabilidad (Summer y Stewart, 1992).

Para Uson et al. (2010) la permeabilidad expresa la facilidad con que los gases y los líquidos fluyen en la masa del propio suelo o de un horizonte a otro. Si el fluido es agua y el suelo está saturado se denomina conductividad hidráulica. Además, indican que la valoración conjunta de permeabilidad y macroporosidad permite estudiar cambios de compactación del suelo.

1.3.3 Compactación del suelo

Según Mon (2008) la compactación es considerada como una forma oculta de degradación del suelo, llamada también como “el enemigo oculto del agricultor”, siendo la superficial más fácilmente controlable ya que la compactación en el subsuelo, especialmente si son arcillosos, es más persistente. Es mejor prevenir la degradación de la estructura del suelo que recuperarla posteriormente.

Reyes (2010) utilizó la metodología Proctor estándar ASTM, con el propósito de estimar el grado de susceptibilidad de los suelos a compactarse; así mismo estimaron relaciones entre las variables de la curva de compactación, humedad crítica y densidad aparente máxima, con las propiedades del suelo; distribución de tamaño de partículas y materia orgánica y determinaron que mayores contenidos de partículas gruesas y bajos contenidos de materia orgánica, originaron mayores niveles de densidad a menores contenidos de humedad, mientras que el predominio de partículas finas y altos contenidos de materia orgánica, produjeron menores niveles de densidad a mayores contenidos de humedad.

Hiller (1980) indica que la condición de humedad es otro factor determinante de la capacidad de carga de un suelo: cuando está seco es abrasivo y a medida que se humedece va aumentando su capacidad de desplazamiento y reagrupamiento de los agregados del suelo, disminuyendo la resistencia del mismo a la compactación.

1.3.3.1 Factores que inciden en la compactación del suelo

Fernández (1997) indica que los factores que condicionan la compactación del suelo son la intensidad de la fuerza aplicada y la estructura de la zona que se compacta. En razón de que uno de estos factores depende del estado físico del suelo y el otro de la forma de compactación, los dos interactúan (Horn, 1990; Kirby, 1993). En general, considera la

humedad del suelo como el factor más importante y responsable de la compactación, definida a través de distintas variables:

a). Variables cuantitativas: densidad, volumen del espacio poroso, distribución del tamaño de poros, fisura por unidad de superficie.

b). Variables cualitativas: que permiten describir la heterogeneidad del perfil y de su morfología.

La fuerza necesaria para compactar disminuye potencialmente con el contenido de humedad del suelo y la densidad aumenta exponencialmente al aumentar la fuerza aplicada (Baver, 1991). Valadão (2014) señala que los efectos negativos de la compactación sobre el desarrollo y producción de los cultivos parecen estar relacionados con las condiciones de aireación y resistencia mecánica, junto al ambiente radicular (Secco, 2003; Días y Pierce, 1996; Imhoff, 2002). A medida que el grado de compactación aumenta, disminuye el contenido de humedad. La porosidad de aireación es considerada como crítica cuando su valor es menor del 10%. Por otra parte, cuando el grado de compactación aumenta, el contenido de humedad baja y la resistencia a la penetración se torna superior a 2 MPa, normalmente considerada como crítica.

De lo expuesto surge otro término derivado del estudio de los factores físicos internos del suelo, que determina el grado de compactación de los mismos, denominado Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) que según Damiano y Moschini (2011) es el rango de agua del suelo dentro del cual el crecimiento de la planta está menos limitado por el potencial de agua, la aireación y la resistencia del suelo a la penetración de las raíces.

Para determinar el IHO Silva et al. (1994) efectuaron ensayos en laboratorio con muestras de suelos, que se compactaban, obteniendo diversas densidades aparentes con contenido de humedad asociada al potencial de la matriz (ψ_m), la resistencia de la penetración (RPS) y la porosidad de aireación (Pa). Lo mismo efectuaron con muestras de suelo sometidas a capacidad de campo (CC), a -10Kpa, el punto de marchitez permanente a -1500Kpa, el contenido de agua en que la resistencia alcanza 2,0 MPa y el contenido de agua en el que la porosidad de aireación del suelo es de $0.10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Gubiani (2013) introduce el término de la densidad del suelo crítica (DscIHO), definida cuando IHO es igual a cero, y viene siendo utilizada como indicador de la compactación

crítica para el crecimiento de la planta. La DscIHO parece estar asociada al contenido de arcilla (Reichert et al., 2009) cuya ecuación es:

$$DscIHO = -0.00078 \times \text{Arcilla\%} + 1.83803 \quad (1)$$

Esta fórmula fue probada por varios autores (Gubiani, 2012) para poder evaluar la relación de rendimiento relativo con la razón $Ds/DscIHO$, en el cultivo de maíz. Valores menores o iguales a 1 y específicamente menores de 0,7 indican que el rendimiento del cultivo decreció acentuadamente (Hakansson y Lipiec, 2000). Según Gubiani et al. (2013) la reducción en el rendimiento en suelos con densidades bajas es ocasionada por la disminución de la conductividad hidráulica por el menor contacto de la raíz.

Wilson et al. (2008) señalan que la obtención de niveles críticos de densidad del suelo (D_s) se considera de gran utilidad para el monitoreo de la condición estructural del mismo y de su capacidad productiva. Existen diversas metodologías de determinación de la densidad de suelo crítica (D_{sc}).

Venanzi et al. (2002), establece que incrementos de la D_s por encima de $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$, producen una reducción lineal del 50% en la biomasa radical del trigo. Estos autores citan a Griffith et al. (1977), quienes determinaron valores críticos de $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$ para suelos arenosos y de $1,4$ a $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ para suelos franco-arcillo-limosos. Por otra parte, Imhoff et al. (2001) definieron a la D_{sc} como aquella D_s en donde el $IHO=0$.

1.3.3.2 Compactación superficial y profunda

Uson (2010) define la compactación del suelo como un incremento de la densidad aparente, un empaquetamiento más denso de las partículas y una disminución de la porosidad, especialmente la macroporosidad.

Becerra et al. (2005) señalan que la compactación es un fenómeno natural que expresa la respuesta del plasma del suelo a las fuerzas dispersivas del agua, acelerado con el uso y manejo de los suelos y según Lowry et al. (1970), citado en FAO (2000), la capa compactada tiene efectos más negativos a 10 cm que a 20 o 30cm de profundidad.

Por su parte, en el trabajo de Reyes (2010) se demuestra que la compactación caracterizada por la reducción del tamaño, continuidad y cantidad de poros se origina por dos vías: la primera en forma pedogénica, debido a ciclos de humedecimiento, el efecto del

tamaño de las gotas de lluvia sobre los agregados de baja estabilidad, lixiviación de partículas finas y transformación de óxidos y secado del suelo. La segunda vía es la antrópica, mediante el uso excesivo de equipos y maquinarias, manejo del cultivo, intensidad del uso del suelo e inadecuado manejo de los sistemas de riego y un elevado coeficiente de pérdida de materia orgánica, constituyéndose potencialmente la mayor amenaza para la productividad agrícola.

Melani (2013) apunta que un elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI), conduce a un reordenamiento poroso, aumentando los microporos con sus consecuencias en la circulación de agua y gases, así como la impedancia mecánica derivada de la pérdida de estructura.

1.3.3.3 Evaluación de la compactación

La evaluación de la compactación del suelo se efectúa midiendo la resistencia a la penetración y su relación directa con el contenido de humedad, esto es, a mayor porcentaje de humedad, menor resistencia. Además, se puede relacionar con el desarrollo del crecimiento radicular, con el rendimiento del cultivo y con propiedades físicas del suelo, un incremento de la densidad conlleva el aumento de la resistencia a la penetración de las raíces.

Letey (1985), Pilatti y Orellana (1993), Da Silva et al. (1994) y otros autores han tratado expresar el efecto de las condiciones físicas a través de la influencia del agua del suelo, sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Así la disponibilidad del agua, aeración, la temperatura y la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la penetración de las raíces (RMP) son variables del suelo que cobran gran importancia.

La resistencia a la penetración (RMP) que ofrece un suelo a ser atravesado, depende de factores intrínsecos como la porosidad, textura, densidad contenido de materia orgánica, contenidos hídricos y de factores extrínsecos con el efecto de uso del suelo y maquinarias (Fernández, 1997).

Estupiñan et al. (2009) indica que valores aceptables de la resistencia a la penetración oscilan entre 10 y 12 Kg.cm⁻² y por encima a 17 Kg.cm⁻², afecta al normal desarrollo de las raíces. A mayor densidad aparente menos espacios porosos y mayor resistencia a la penetración, que dificulta el movimiento del agua.

Esta resistencia puede ser medida a través del penetrómetro, cuya punta tiene forma cónica, de superficie conocida y con un ángulo normalmente de 30° y va registrando distintas lecturas a medida que profundiza en el suelo, expresada como fuerza por unidad de área en Kpa.

Uson et al. (2010) señalan que el desarrollo del cultivo puede verse muy afectado cuando los valores de penetración son superiores a 5 MPa; sin embargo, el laboreo, se dificulta cuando la resistencia es superior a 2 MPa, pudiendo ser directamente proporcional con la humedad del suelo. Sin embargo, Navarro (1994) sugiere que la resistencia del suelo a la penetración se mantenga por debajo de 1 MPa, para un crecimiento vegetal, aunque existen especies vegetales que requieren valores más bajos.

Reinert et al. (2007) proponen valores críticos y limitantes de parámetros físicos, para evaluar el grado de compactación de suelos de diferentes texturas. Cuando el intervalo hídrico es cero, proponen valores de densidades de 1,7 a 1,8 Mg.m⁻³, para suelos de textura franco arenosa. A partir de esos datos se comprobó una reducción en el crecimiento radicular y la productividad del cultivo de la soja y frejol (Reinert et al., 2006). Otra propuesta relaciona la densidad del suelo con la macroporosidad de 0,10 m³.m⁻³, considerado como ideal para el mejor crecimiento y desarrollo radicular, para obtener la densidad crítica.

Gubiani et al. (2013) establecen la resistencia mecánica del suelo suficiente para interrumpir el desarrollo radicular del mijo como ($\sigma_{max} = 4 - 2,33 |\psi_m|$). Esa ecuación fue obtenida para medidas de resistencia mecánica (RPS), en intervalo de 0 a 2,9 MPa y potenciales matriciales mayores que -0,63 MPa. Como la presión ejercida por las raíces es de la misma magnitud que σ_{max} , la ecuación señala, con cierta reserva que valores de potenciales menores que -0,63 MPa, puedan contener error y cuando el $|\psi_m|$ fuera igual a 1,72 MPa la raíz no ejerce ninguna fuerza contra el suelo ($\sigma_{max} = 0$) y, por consiguiente, no tiene efecto de la resistencia mecánica del suelo contra el desarrollo radicular.

Eracilda (2012) encontraron una reducción del 50% en la longitud radicular de algunos cultivos cuando la resistencia a la penetración fue 1,1 MPa. Sin embargo, estos valores van de 2-5 Mpa y, de manera general, se considera 2,0 MPa como valor crítico de resistencia al suelo y al crecimiento radicular. Taylor et al. (1966) indican, además, que estos valores pueden variar con el desarrollo del cultivo. Con valores críticos de resistencia a la penetración, las raíces presentan dificultad para atravesar la capa inhibidora, desarrollándose

superficialmente, restringiendo la absorción de nutrientes y el contenido volumétrico del agua del perfil del suelo.

Horn y Smucker (2005) concluyen que el aumento de la resistencia mecánica del suelo está en relación directa con el aumento de la densidad y disminución del contenido de humedad y que ello determina un aumento de la cohesión de las partículas del suelo.

La determinación de la RMP se lleva a cabo en la vertical, aunque algunos autores han efectuado medidas horizontales, en cada uno de los niveles del suelo, existiendo una variabilidad de instrumentos, los de tipo de compresión y penetrómetros de puntas cónicas.

1.4 Retención del agua en el suelo

Desde el punto de vista de la producción agrícola, junto con el contenido en agua de un suelo, es imprescindible conocer la energía con que el agua esta retenida, el movimiento de la misma hacia la planta, la atmósfera y hacia otras zonas del suelo ya que son procesos regulados por diferencias de estados energéticos.

Sobre el agua del suelo actúan fuerzas muy variables y de diversa intensidad y dirección, creando diferencias de energía potencial entre unos puntos y, por consiguiente, el movimiento del agua entre ellos (Olalla, 1993).

Jaramillo (2002) destaca que el agua del suelo se presenta adherida a las partículas sólidas en forma de películas a no se ser que esté en saturación, por lo que se deduce que sobre el agua del suelo intervienen una serie de fuerzas de diversa magnitud y dirección.

1.4.1 Potencial del agua en el suelo

Jury et al (1991) destacan que el agua del suelo está sometida a varias fuerzas: una vertical hacia abajo por efecto de la gravedad o por efecto de su propio peso y el peso de las partículas sólidas, el campo de fuerza que generan en todas las direcciones los sólidos del suelo, las fuerza que ejercen los iones disueltos en el agua atrayéndose entre ellos y, finalmente, la fuerza de atracción entre moléculas de agua y el desbalance entre esta y la interface agua – aire.

1.4.1.1 Potencial matricial (Ψ_m)

Olalla (1993) indica que este potencial del agua se debe a las fuerzas de atracción del agua por las superficies sólidas del suelo (matriz del suelo) y las fuerzas de atracción molecular entre las propias moléculas del agua.

Stephens (1996) estudia el efecto de los sólidos del suelo sobre el agua al atraerlo hacia ellos a través de dos mecanismos: las fuerzas de capilaridad, que actúan cuando el suelo está húmedo y el agua es retenida en los poros más grandes, y las fuerzas de absorción, cuando los suelos están secos, recubriendo las partículas sólidas de una ligera película, por el efecto bipolar del agua. El efecto de capilaridad se da en los suelos secos, lo que hace que el agua se mueva en todas las direcciones.

El potencial mátrico en suelos saturados tiene un valor de cero en razón que los poros están llenos de agua, mientras que en los suelos secos es negativo y está relacionado con altura que alcanzaría una columna de agua en el suelo.

1.4.1.2 Potencial gravimétrico (Ψ_g)

El potencial gravitacional del agua del suelo en un punto está determinado por la elevación de este, con relación a un nivel de referencia seleccionado arbitrariamente.

Este potencial puede ser positivo, negativo o igual a cero, si el punto de evaluación está por encima, por debajo o en el nivel de referencia. Su valor corresponde a la distancia vertical que haya entre el punto de interés y el nivel de referencia seleccionado (Jury et al., 1991).

Según Jaramillo (2002) la medida del potencial gravitacional (Ψ_g) se hace directamente en el suelo; es la distancia que hay entre el nivel de referencia y el punto de interés en el suelo.

1.4.1.3 Potencial osmótico (Ψ_o)

Según Olalla (1993) es la parte del potencial que resulta de las fuerzas de atracción que ejercen los solutos sobre las moléculas del disolvente.

El valor del potencial osmótico se ve reducido con la presencia de iones en el agua y en el agua del suelo es siempre negativa.

Desde el punto de vista agronómico, este potencial es importante en la interacción entre las raíces de las plantas y el suelo, considerando que el agua se mueve desde la solución de menor concentración a una de mayor concentración, cuando ambas están separadas por membranas permeables al agua (Hillel, 1998). Este potencial es de vital importancia en los

sistemas de riego por goteo en zonas áridas, con suelos alcalinos y con agua de baja calidad, donde la zona de menor concentración de sales está en el centro del bulbo húmedo y donde se ubica la mayor área radicular y las concentraciones aumentan en la periferia del mismo.

1.4.1.4 Potencial de presión (Ψ_p)

Se la conoce también como presión hidrostática (Hillel, 1998). Cuando el suelo está saturado, se crea una carga hidrostática sobre el agua que se encuentra en un determinado punto del suelo, teniendo un valor positivo y proporcional a la altura que adquiere la lámina de agua sobre el punto de estudio. Este potencial tiene un valor de cero en suelos secos.

En definitiva, se pueden establecer relaciones genéricas de los potenciales totales Ψ (t) del agua en el suelo.

$$\Psi(t) = \Psi(g) + \Psi(o) + \Psi(m) \quad \text{Para suelos no saturados} \quad (2)$$

$$\Psi(t) = \Psi(g) + \Psi(o) + \Psi(p) \quad \text{Para suelos saturados}$$

(3)

En términos de energía/peso o carga de potencial o cabeza hidráulica, la cabeza de potencial total, con fines de diseño de sistema de drenaje será:

$$H = z + m \quad \text{Para suelos no saturados} \quad (4)$$

$$H = z + h \quad \text{Para suelos saturados} \quad (5)$$

Dónde:

H = Cabeza hidráulica

z = Cabeza de potencial gravitacional

m = Cabeza de potencial mátrico

h = Cabeza de potencial de presión

El potencial total del agua del suelo es negativo, ya que su valor es menor que la presión atmosférica.

1.4.2 Contenido del agua en el suelo

Según Olalla (1993) el espacio poroso de los suelos, en condiciones normales, está ocupado, en parte, por agua con sustancias disueltas (sales y gases) y otra parte por una mezcla de diversos gases (entre ellos vapor de agua), que se conoce como “aire del suelo”.

“La cantidad de agua que posee el suelo está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico – edáfico, por el aporte natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como el consumo causado por la evapotranspiración” Jaramillo (2002). Debido a que el agua del suelo se adhiere a las partículas sólidas del mismo, hay una estrecha relación entre la cantidad de agua que son capaces de retener estas partículas y su componente. Jury et al. (1991) reporta que la capacidad de absorción de la montmorillonita es mayor que la de la illita y ésta a su vez mayor que la de la caolinita.

Demuner et al (2012) en estudios efectuados sobre retención de humedad en un suelo franco arcilloso (40% de arena, 29% limo y 31 % de arcilla) bajo el efecto de tres sistemas de labranza a dos profundidades (5 -7,5cm y 10 a 12,5 cm), determinaron que la labranza cero retuvo significativamente mayor cantidad de agua 21,32%, respecto a la labranza vertical de 15,32%.

Brown Cotton (2011) citado por Dumer et al. (s/f) indica que la aplicación de composta incrementa la capacidad de retención de humedad y que estos incrementos son más visibles en suelos de textura finas.

1.4.3 Determinación del contenido de humedad del suelo

Olalla (1993) concluye que el contenido de humedad de los suelos y el estado energético de los mismos sobre el crecimiento de los vegetales es de vital importancia, así como su efecto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, y el grado de compactación, por lo que se han desarrollado varios métodos para determinar su contenido. Es importante resaltar la dificultad que se tiene para obtener datos representativos en razón de la variabilidad vertical y horizontal de dichos contenidos debido a la dinámica del agua, a irregularidades en la distribución radicular, a los cambios topográficos y a las diferentes propiedades físicas del suelo en distintos sectores.

1.4.3.1 Medición directa del contenido hídrico del suelo

La estimación de la humedad de un suelo es importante en el área agrícola, en los diversos campos de la investigación y para un manejo adecuado de las láminas a aplicar al suelo, así como también permite determinar la frecuencia y el tiempo de riego. Además, resulta importante conocer los excesos de agua que afectan al sistema radicular del cultivo, por la

degradación de la estructura del suelo. El valor del contenido hídrico puede determinarse por gravimetría o contenido volumétrico considerando la densidad aparente de los suelos (Olalla, 1993).

1.4.3.2 Mediciones indirectas del contenido hídrico del suelo

Se han desarrollado una serie de métodos y equipos que permiten determinar el contenido de humedad del suelo de forma indirecta, siendo necesario una curva de calibración que permita pasar el valor obtenido a contenido de agua existente en un suelo.

A. Tensiómetro

Este instrumento mide el potencial matricial directamente en el campo. Se compone de una cápsula de cerámica porosa situada en el extremo inferior que está conectada por un tubo de plexiglás, normalmente transparente, y que en su parte superior lleva un tapón y lateralmente un vacuómetro, donde se efectúan las lecturas por el desplazamiento mecánico de la aguja del dial, cuando hay diferencia de potencial en el suelo. La cápsula de porcelana es permeable al agua y a los solutos, pero no al aire.

Ventajas:

- Aporta una medición directa del potencial mátrico del suelo.
- Tiene un radio de acción de 10 cm.
- No necesita energía eléctrica.
- Su lectura se puede automatizar con traductores de presión y un equipo registrador.
- No se ve afectado por la salinidad del suelo, debido a que los solutos pueden moverse libremente a través de la cápsula.
- Posee un bajo costo de adquisición (Mestas, 2011).

Limitaciones:

- Requiere estar permanente en el suelo.
- Necesita revisión y control del agua. Si el nivel del líquido cae por debajo del punto de inserción del manómetro (cuando existen periodos secos y no se revisan) hay que volver a instalarlos nuevamente.
- Los vacuómetros de Bourne, no son muy precisos.
- La lectura es del potencial del suelo y no del contenido de humedad. Para ello es necesario disponer de la curva de succión. El fenómeno de histéresis en la curva de

succión del suelo puede introducir errores en las lecturas según se haga la lectura en periodos secos o húmedos.

- Sus lecturas son válidas hasta -80 Kpa.
- Tiempo de respuesta lento.
- No recomendado en sistema de riego de alta frecuencia.
- En suelos expansibles la cápsula puede perder contacto con el suelo, por lo que habría que instalarlo nuevamente (Mestas, 2011).

B. Reflectometría de dominios magnéticos temporales (TDR)

Olalla (1993) señala que la reflectometría es un método que mide la constante dieléctrica del suelo por medio del tiempo recorrido de un pulso electromagnético que se introduce en el mismo a través de dos varillas de acero inoxidable hincadas que sirven de guía a las ondas. El tiempo de recorrido para una longitud dada de las varillas, es proporcional a la constante dieléctrica del suelo, que únicamente varía con el contenido de agua en el mismo.

Según Mestas (2011) el método se basa en determinar la constante dieléctrica compuesta del suelo (ϵ_c), mediante el tiempo de desplazamiento, t (del orden de 100ps a 20ns), de un pulso electromagnético (generado a partir de ondas en un rango de frecuencias, p.ej. 0,02- 3 GHz) que se propaga a lo largo de una línea de transmisión rodeada de suelo (Ferre y Topp, 2002).

$$\epsilon_c = (C \times T / L)^2 \quad (6)$$

Dónde:

ϵ_c = constante dieléctrica compuesta del suelo.

L = longitud de propagación.

C = La velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

T = tiempo de desplazamiento.

La sonda por la que se desplaza el pulso electromagnético consta de dos o tres varillas paralelas de acero inoxidable de longitud L que, junto con el suelo (como material dieléctrico), actúan como una línea de transmisión coaxial. La discontinuidad en la línea de transmisión que implica la sonda introducida en el suelo hace que parte del pulso sea reflejado, lo que produce cambios en la energía de la línea de transmisión. El tiempo de desplazamiento a lo largo de las varillas (efectuado por ϵ_c y, por consiguiente, por θ) se obtiene analizando la gráfica de evolución de este nivel energético.

Olalla F. (1993) indica que este método sirve para medir la humedad volumétrica con un margen de error del 1 - 2 % y que no precisa calibración según el tipo de suelo.

C. Reflectometría de dominios magnéticos de frecuencia (FDR)

Mestas (2011) se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de humedad y la constante dieléctrica compuesta del suelo (ϵ_c). Su medida se efectúa mediante electrodos (placas paralelas o anillos metálicos), que junto con el suelo (como material dieléctrico) constituye un condensador que se conecta a un circuito oscilador.

Cuando varía ϵ_c (debido al contenido de humedad del suelo), cambia la capacitancia del suelo y, por tanto, la frecuencia de oscilación del circuito. Este es el principio de funcionamiento de los sensores de capacitancia; un sensor FDR trabaja de manera similar, pero en este caso se hace un barrido de frecuencias de manera que la frecuencia de resonancia indica el contenido de humedad del suelo.

Dentro de los equipos portátiles podemos encontrar los siguientes:

- El Diviner 2000: permite medidas en varias profundidades sin restricción de distancia entre ellas. Se deben instalar primero los tubos PVC en los sitios que se va evaluar y posee un sistema que permite al sensor efectuar lecturas cada 10 cm. Los datos son visualizados en una pantalla o se almacenan para luego transferirlos a un procesador de datos.
- Equipos FDR fijos automáticos: son sistemas de monitorización del contenido de agua del suelo en tiempo real, llamado Enviro SCAN (ES), desarrollado por Sentek. Este sensor se puede adaptar tanto a la heterogeneidad del suelo en el que está instalado, como a la densidad radicular del cultivo, instalando más o menos sensores de medida en profundidad (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 1999; Fares y Alva, 2000; Sentek, 2001; Ferre y Topp, 2002).

Cada sensor de 5,1 cm de diámetro y 7,5 cm de longitud mide en una distancia axial de 10 mm, aunque aproximadamente el 93% de la señal radial solo afecta a una distancia de tres centímetros del tubo de acceso (Paltineanu y Starr, 1997).

Las sondas FDR deben ser calibradas antes de la instalación por medio de lecturas de frecuencia específicas en agua y en el aire seco. La frecuencia normalizada o universal (SF) se calcula, entonces, de la siguiente manera:

$$SF = (SFa - SFs) / (SFa - SFw) \quad (7)$$

Dónde:

SFa = Lectura de frecuencia del sensor en el aire seco

SFs = Lectura de frecuencia del sensor en el suelo

SFw = Lectura de frecuencia del sensor en el agua

El contenido de agua en el suelo (θ) es, entonces, una función exponencial de SF

$$\theta = \left(\frac{SF - c}{a} \right)^{1/b} \quad (8)$$

Dónde:

a, b, c; son coeficientes que varían según la calibración, dependiente del tipo de suelo.

Dependiendo de los coeficientes de calibración, se puede obtener la humedad gravimétrica o volumétrica. La calibración de fábrica es válida para un amplio intervalo de valores en distintos tipos de suelo y condiciones, pero no es aplicable en los casos de arenas gruesas, arcillas expansibles, suelos con contenidos de materia orgánica altos y suelos salinos (Starr y Paltineanu, 2002).

Ventajas:

- Alta precisión ($\pm 0,01\%$), si se usa una calibración específica del suelo.
- Medida in situ y rápida, no destructiva.
- Permite operar en suelos con alto grado de salinidad, no tolerada con los FDR.
- Operatividad sencilla.
- Señal de salida de tipo analógico, lo que permite su conexión a cualquier sistema de adquisición de datos convencional y la automatización de las medidas.
- Flexibilidad en el diseño del sensor, así como de la frecuencia de trabajo.
- Bajo costos de adquisición, al utilizar electrónica sencilla.

Limitaciones:

- Trabaja con ondas de baja frecuencia, por lo que la estimación de la constante dieléctrica está más influida por la conductividad eléctrica, densidad aparente y contenido de arcilla por lo que su calibración es imprescindible.
- Un buen contacto entre el suelo y el sensor resulta crítico para obtener estimaciones fiables.
- Precisa de instalación cuidadosa, para evitar que queden espacios porosos entre la sonda y el suelo.

- Zona de influencia pequeña con radio de hasta 4 cm (Mestas, 2011).

1.4.4 Curvas de retención de humedad

Las curvas de retención presentan tres zonas, definidas por el proceso de saturación:

1. Zona de saturación: los poros están llenos de agua, el límite de esta zona permite el ingreso del aire.
2. Zona de desaturación: el agua que se encuentra es desalojada por el aire y el agua dentro de los poros se torna inmóvil, siendo fácilmente aprovechable para la mayor parte de los cultivos; se nota un aumento de la tensión con que está retenida al suelo.
3. La zona de saturación residual: el agua se mantiene inmóvil, con baja o nula conductividad hidráulica y termina con un contenido cero de agua con tensión de 15 bares.

En la determinación de la curva de retención hídrica (CRH), se utiliza el modelo uniparamétrico elaborado por Damiano (1999), que usa la siguiente función:

$$\theta = \theta_s e^{0.571 + \left(\frac{-1.753 - \ln \psi_m}{b_1} \right)} \quad (9)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_s contenido volumétrico del agua en suelo a saturación en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; ψ_m , es el potencial mátrico, Kpa; b_1 es la pendiente escalar por horizonte, calculada por derivación:

$$b_1 = \frac{\ln \psi_m(-33 \text{KPa}) + 1.753}{0.571 - \ln \left(\frac{\theta(-33 \text{KPa})}{\theta_s} \right)} \quad (10)$$

y, θ medido a (-33 Kpa).

1.4.5 Intervalo hídrico óptimo (IHO)

Letey (1985) señala que un indicador físico utilizado es el denominado rango de agua no limitante del suelo (NLWR). Posteriormente, Da Silva et al. (1994) desarrollaron el concepto (NLWR) cuantitativo renombrándolo como el rango de agua menos limitante (LLWR). Este rango integra, en un único parámetro, el contenido de agua, el potencial mátrico, las resistencias mecánicas y porosidad llena de aire; todos ellos se relacionan con el crecimiento vegetal. El LLWR fue utilizado en Nueva Zelanda según Zou et al. (2000) y posteriormente

en Estados Unidos tal como señalan Siegel- Issem et al. (2005) en diferentes especies de pino.

Orellana et al. (1997) utilizaron el concepto de Letey (1985), para evaluar la calidad física del suelo, denominada Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) del suelo, definido como la humedad óptima del suelo disponible para las plantas. Integrado por tres factores:

- El efecto del potencial matricial.
- La energía de retención.
- Aireación y resistencia del suelo a la penetración de las raíces.

La amplitud del IHO en los cultivos, provoca estrés estructural, que afecta directamente al desarrollo de los cultivos (Silva et al., 1994; Silva y Kay, 1997; Tormena et al., 2007; Pereira et al., 2010).

Collares et al. (2006) evaluaron el IHO en Argissolos brasileños, bajo diferentes niveles de compactación, comprobando que, en todos los tratamientos, el contenido volumétrico del agua permanecía dentro los límites del IHO, esto es, entre el contenido volumétrico del agua a capacidad de campo y contenido volumétrico en el punto de marchitez permanente.

Valadão (2014) señala que el Intervalo Hídrico Óptimo es más reducido, a medida que el estado de compactación aumenta (aumentando la densidad del suelo) y ocurre la degradación de la estructura (Silva, 2003). La aireación del suelo puede restringir la difusión del oxígeno y, por consiguiente, el crecimiento radicular, cuando el contenido de agua está abajo de la CC, la resistencia a la penetración puede restringir el crecimiento radicular y el contenido de agua es superior que el correspondiente al PMP. A partir del IHO, se obtiene un valor de densidad de suelo donde el valor de IHO es cero, que se denomina densidad crítica (DscIHO).

Para determinar el IHO, es necesaria la curva de retención del agua y la resistencia mecánica a la penetración. La relación funcional entre el potencial mátrico (ψ_m) y contenido de agua en el suelo se ajustó por el procedimiento descrito por Silva et al. (1994). De este modo, recogieron muestras con estructura sin alterarse en cilindros de 5 cm de alto por 5,7 cm de diámetro y se le aplicaron tensiones de -6 y -10 Kpa y -33, -50, -70, -100,-500 y -1500KPa de presión en las membranas porosas colocadas en las ollas de presión. Después de

24 horas, las muestras se pesaron y se utilizaron posteriormente para determinar la resistencia a la penetración (Da Silva y Kay, 1997).

Valadão (2014) señala el mismo criterio anterior para determinar el IHO, saturando las muestras y sometiéndolas a tensiones de 0,001; 0,006; 0,01Mpa, en columnas de aire (Reinert y Reichert, 2006) y de 0,03; 0,1; 0,5 y 1,5 MPa en cámaras de Richards (Klute, 1986), en cada tensión trabajó con diversas muestras a distintas profundidades de 10, 20, 30, 40 cm en zonas de pastoreo y 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; y 30-50 cm en áreas de pastoreo, eran agrupados de manera que en cada tensión hubiese una amplitud de valores de Ds. Las muestras eran llevadas a peso constante y sometidas a las pruebas de resistencia a la penetración por un penetrómetro electrónico de manco con varilla metálica y con área basal de 129 mm², diámetro de base 12 mm y un ángulo de 30° (Reinert et al., 2007) a una velocidad constante de 10mm/min.

La densidad del suelo (Ds) y contenido de humedad (Θ) fueron calculados después de obtener la masa de suelo seco a 105°C por 24 horas. Los datos de RMP, Ds, y Θ fueron ajustados al modelo de Busscher (1990): $RMP = a Ds^b \Theta^c$, siendo a, b, c coeficientes de ajuste.

La curva de retención de agua (CRA), fue obtenida de las mismas muestras utilizadas para medir la RMP. La humedad de las muestras fue cuantificada sin alteración de la estructura del suelo en las pruebas de penetración.

Rodríguez Da Silva (2003), utilizando valores críticos de resistencia a la penetración (RMP) de 2 MPa y de porosidad del 10% observan que el IHO disminuye para cada valor de compactación en cada suelo. En argissoles, el límite superior IHO era Θ 0.01 hasta una densidad del suelo aproximadamente 1,8Mg.m⁻³; 1,43 Mg.m⁻³ en un oxisol y 1,40 Mg.m⁻³ para un oxisol rojo distroférico. En cambio, para una RMP de 1MPa es IHO es cero y la densidad fue 1,60Mg.m⁻³ para un suelo argisol, 1,3 Mg.m⁻³ para un oxisol rojo distrófico y 1,28 Mg.m⁻³ para un oxisol rojo distroférico.

La metodología de determinación de la densidad crítica del suelo (Dsc) cuando el intervalo hídrico es nulo, es una evaluación conjunta de los factores directamente relacionados con el desarrollo de las plantas, tales como la resistencia a la penetración (RMP), la porosidad de aireación (PA) el contenido de agua en capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez

permanente (PMP). El valor de la densidad del suelo donde IHO es cero es considerado como la densidad crítica (Dsc) al desarrollo de los cultivos (Rodríguez, 2003).

1.5 Medidas que ayudan a enfrentar el problema de la compactación

1.5.1 Mejoradores físicos

Pla (1989) señala que para contrarrestar los problemas de compactación, debido a los aspectos ya señalados se podría utilizar enmiendas orgánicas y minerales, reducir las labores mecánicas, elegir adecuadamente los sistemas de riego o efectuar roturaciones al suelo (herculizada). Por su parte Suárez (2012) indica que la remoción con tres pases del Hércules (roturador) en media luna realizados en el cultivo de banano incrementa la porosidad y porcentaje de raíces vivas y, con esto, la actividad de los microorganismos del suelo, ligados a la mineralización de la materia orgánica y liberación del nitrógeno, que produce las mejores relaciones suelo-planta. Esta práctica debe efectuarse en suelo seco para su ruptura y disgregación, de lo contrario solo se efectuaría un corte vertical.

Estévez y Eugenio (2006) afirman que, de acuerdo a las investigaciones, se conoce que la labor de roturación aporta resultados más favorables cuando se incorpora materia orgánica.

Mon (2007), utilizando subsolado en suelos franco limoso y franco-arcillo-limosos en un cultivo de algodón, donde había una compactación subsuperficial, aplicó una mezcla de cal con muriato de potasio en las hendiduras a tres niveles de profundidad.

1.5.2 Mejoradores químicos

Mon (2008) con dosis de yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, tuvo una respuesta en el crecimiento, desarrollo y en los parámetros morfológicos del cultivo y, a los 40 meses, se observaron los efectos físicos y químicos positivos de la enmienda. Aplicaciones de yeso de $5 \text{ Mg}\cdot\text{Ha}^{-1}$ mezcladas en suelo compacto, determinaron una disminución de la compactación por debajo de los 5 cm y la resistencia a la penetración nunca excedió de 2,5 Mpa (Mon, 2008).

La aplicación del yeso reduce las concentraciones de aluminio y/o manganeso a niveles no tóxicos y, por lo tanto, estimula un enraizamiento más profundo, mientras que la cal, siendo poco soluble, es efectiva en capas superficiales.

Jayawardane et al. (1995) aplicando yeso en hendiduras de 0,15 m de ancho y 0,80 m de profundidad en suelos limosos lograron descompactar superficialmente el suelo hasta un 25%, disminuyendo la resistencia a la penetración de las raíces.

Iñiguez (1999), menciona que el encalado tiene efectos directos e indirectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas que inciden en la producción de banano. Dentro de los efectos directos cabe destacar que mejora la capacidad de infiltración del agua en el suelo y como efecto indirecto, la aplicación de yeso en un suelo compactado y ácido en profundidad logra disminuir el efecto del aluminio soluble aumentando el calcio soluble (Sumner et al., 1986; Mon, 2008), lo que mejora la resistencia a la penetración favoreciendo, además, el agrietamiento y, por lo tanto, la aireación del suelo.

Steed et al. (1987) mencionan que la enmienda calcárea en profundidad mejora la sortividad del suelo y la capacidad de absorber el agua, disminuye la resistencia a la penetración y aumenta la productividad.

Según FAO (s.f.) el limitado enraizamiento puede deberse a la presencia de concentraciones de niveles tóxicos de Al^{3+} y Mn^{2+} , alta salinidad o severa deficiencia nutricional, especialmente del fósforo o la ausencia de oxígeno por las variaciones del nivel freático. El rompimiento de estas capas por medios mecánicos crea espacios porosos más grandes que facilitan el desarrollo radicular y, por ende, un mejor aprovechamiento de la humedad del suelo y nutrientes de las capas más profundas. Además, sugiere que aplicando cal, con o sin yeso, se mejora la estructura del suelo y se reduce la concentración de aluminio y manganeso a niveles no tóxicos, lo que estimula un mejor enraizamiento profundo; en cambio la aplicación solo de cal poco soluble es más efectiva en la capa superficial del suelo.

Castellanos (2000), señala que en muchas regiones húmedas y semiáridas los suelos tienen una estructura inestable y tiende a dispersarse y formar una suspensión estable de partículas en el agua, desarrollando una estructura más compacta en la superficie del suelo. La dispersión de las arcillas es causada por la repulsión mutua entre las partículas de arcilla que resulta de la presencia de campos eléctricos negativos que la rodea; en cambio, la floculación es el proceso inverso, en la que la doble capa eléctrica, está suficientemente comprimida para que las fuerzas atractivas permitan la coagulación de las partículas de arcilla individuales en microagregados.

Dantsova et al. (2005) señalan que la aplicación de yeso puede reducir la dispersión y promover la floculación de los suelos, siendo ésta necesaria para la formación y estabilización de la estructura del suelo, mejorando, por lo tanto, la infiltración y percolación del agua.

Por otra parte, el yeso ayuda a reducir la dispersión de las arcillas que conlleva a la formación de costras que dificulta la infiltración del agua y provoca escorrentías, mitiga la acidez y la toxicidad del aluminio, favoreciendo el enraizamiento y la capacidad de las plantas para absorber adecuadamente agua y nutrientes. El calcio presente en el yeso puede intercambiarse con el sodio, conduciendo a la floculación de las partículas del suelo.

El sodio es un elemento nocivo para el suelo, provoca la defloculación de las arcillas y el colapso de los agregados que conduce a la compactación de los suelos, a la pérdida de la infiltración y a severas limitaciones en la conducción vertical de los gases que dificulta la respiración de las raíces.

Chen y Dick (2011) añaden que la dispersión del suelo es causada principalmente por iones altamente hidratados, tales como Na^+ y Mg^{2+} atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. La adición de Ca^{2+} soluble, puede superar los efectos de la dispersión de los iones de Na^+ y Mg^{2+} y ayudar a promover la floculación y desarrollo de una mejor estructura del suelo.

1.5.3. Mejoradores biológicos

La cobertura vegetal que intercepta las gotas de lluvia y reduce la escorrentía, mejora la estructura y porosidad del suelo, aumenta la actividad biológica y la capacidad de almacenaje de agua del mismo.

Goss (1991) indica que alrededor del 20% del carbono fijado por las plantas pasa al sistema de raíces y un quinto del mismo pasa directamente al suelo durante el ciclo de crecimiento del cultivo. El resto contribuye a la materia orgánica del suelo cuando decae o muere, lo que promueve la estabilidad estructural y la disponibilidad de nutrientes.

Crosara (2004) menciona que existen agentes físicos, químicos y biológicos que actúan en el desarrollo de las uniones que forman los agregados, siendo necesario la presencia de coloides floculados, que actúan como cemento en las partículas primarias con un alto potencial iónico, como por ejemplo el calcio.

Valadão (2014) indica que la inserción de plantas de cobertura en un sistema de rotación y sucesión de cultivos, tiende a provocar una disminución en la compactación de los suelos. Con una rotación de dos años con trigo y dos años con avena, se logró un incremento de los poros de tamaño medio (0.19 a 8.81 μm); sin embargo, los efectos benéficos de las plantas de cobertura sobre las propiedades físicas como infiltración del agua, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración, no han sido comprobados (Texeira et al., 2003; Genro Junior et al., 2004).

FAO (s.f.) señala que el uso de cobertura vegetal actúa como un subsolador biológico, que penetra en los horizontes densos; además, se señala que los bioporos creados por las raíces son más estables que los formados por acción mecánica, en razón de la liberación de sustancias orgánicas, entre otros, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, que crean estabilidad en las superficies internas de los canales. La muerte de las raíces sufre una contracción dejando poros de diversos diámetros que permiten que el sistema radicular penetre y se desarrolle normalmente.

Existen especies promisorias de cultivo de cobertura que han dado muestra de ser potenciales subsoladores biológicos. Uno de ellos es el pasto Bahia (*Paspalum notatum*) ya que cuando sus raíces se descomponen aportan bioporos, por lo se convierte en una herramienta biológica de descompactación del suelo así como la *Festuca elatior*, el pasto Guinea (*Panicum maximum*), la alfalfa (*Medicago sativa*), el gandul (*Cajanus cajan*), el caupi (*Vigna unguiculata*) y los árboles fijadores del nitrógeno como (*Tephrosia vogelii*) (FAO, s.f.).

Esta práctica de cobertura vegetal está siendo utilizada en plantaciones bananeras orgánicas, como el Kudzu (*Pueraria phaseoloides*) que, además de incorporar materia orgánica al suelo, posee un sistema radicular de más de 50 cm de longitud que sobrepasa la zona compactada, favoreciendo la formación de macroporos y mejorando la estructura del suelo.

1.6 Evaluación de los sistemas de riego presurizado

El diseño agronómico, el diseño hidráulico y el manejo de los sistemas de riego presurizados son de vital importancia para restituir al suelo las necesidades de agua de los cultivos y tener una productividad óptima. Entre los factores que se manejan para proveer el agua necesaria a los cultivos se encuentran: energía, disponibilidad de agua, mano de obra calificada y sistematización o equipamiento, existiendo una completa interrelación entre todos ellos.

El diseño de un sistema de riego pasa por etapas bien diferenciadas: el diseño agronómico que tiene relación con el suelo, agua, planta y tamaño de la finca y el diseño hidráulico, que guarda relación con el dimensionamiento más económico de la red, selección de aspersores con alto coeficiente de uniforme y grupos generadores de energía eficiente, con el objeto de poder tener un riego uniforme en todas las áreas del cultivo.

1.6.1 La energía de impacto de la lluvia que producen los sistemas de riego presurizados

Un factor externo en el grado de compactación del suelo pueden ser los riegos presurizados ya que Montero y Tarjuelo (2001) analizando el proceso de rotura del chorro emitido por un aspersor, pudieron apreciar su complejidad distinguiéndose una zona inicial, normalmente de no más de 1 a 2 metros, donde el chorro es bastante compacto y otra zona donde está casi totalmente desintegrado, existiendo entre ellas una zona de transición.

Gubiani (2014) determina una probabilidad de interrelación entre la compactación e irrigación sobre el rendimiento de los granos del 86%, menor que los 95% normalmente usados para los que existe apenas un 5% de error. Con riesgo del 14% asume que había una dependencia de la irrigación para el efecto de los niveles de compactación.

Fonseca (2000) utilizó un simulador de lluvia pendular con una prueba de duración de 35 minutos, y aplicó lluvias con 5 diferentes valores de energía cinética (138, 184, 229, 275, y 321 J.m⁻²) correspondiéndole intensidades de 30, 40, 50, 60 y 70mm.h⁻¹ respectivamente. Con los resultados obtenidos se puede ajustar la ecuación de regresión entre las pérdidas de suelo y de agua y el tiempo de precipitación. Utilizando las ecuaciones ajustadas, se obtuvieron

valores de pérdidas que varían de 2,83 a 26,82 g.m⁻² (de suelo) y de 0,00209 a 0,01370 m³.m⁻² (agua), cuando la energía cinética de lluvia varía de 138 a 321 J.m⁻², respectivamente. Comparando los valores simulados con los datos de campo, se verifican variaciones máximas de 3,4 a 5,7% para pérdidas de suelo y agua, respectivamente.

1.6.2 Velocidad de salida y tamaño de las gotas

La velocidad de salida del chorro por encima de 20 m.s⁻¹ es suficiente para provocar su desintegración en gotas (interviniendo fuerzas de inercia, viscosidad y de tensión superficial). La periferia del chorro produce gotas pequeñas, mientras que la de las proximidades del eje del chorro, gotas gruesas por la menor velocidad relativa del aire.

El tamaño de las gotas incide en muchos procesos de la distribución del agua; las pequeñas gotas son fácilmente arrastradas por el viento, afectando el modelo de reparto de la lámina de agua, mientras que las gotas gruesas, tienen gran energía cinética, la cual es transferida a la superficie del suelo, pudiendo romper los agregados y afectando a la capacidad de infiltración o la formación de costras.

Montero (2000) concluye que, a una cierta distancia, desde el chorro del aspersor cae una gama de tamaños de gotas diferentes; los diámetros medios de gotas son mayores cuanto mayor es la longitud de alcance del chorro, siguiendo un modelo exponencial, y los tamaños de gotas máximos que llegaron a medirse en su trabajo fueron de 7 y 9 mm.

Kincaid (1996) citado por Nin (2008), tras medir las distribuciones de tamaños de gotas de diferentes tipos de emisores mediante el método laser, calculó las velocidades de las gotas utilizando un modelo balístico. Desarrollo un método para estimar la energía cinética para un tipo particular de aspersor con un tamaño de boquilla dado y funcionando a una presión determinada; la energía cinética de las gotas variaba desde 5 a 25 J.Kg⁻¹ y también se dedujo que el viento incrementaba la energía de las gotas y que la elevación de la boquilla respecto al suelo tenía un pequeño efecto sobre la energía de las gotas.

Bautista et al. (2008) indican que las gotas de agua emitida por un aspersor contienen diversos niveles de energía cinética, debido a su variabilidad de diámetros y, por lo tanto, en sus masas y en velocidades. Se han utilizado técnicas experimentales, como la disdrometría y

fotografías que ha permitido comprobar que su diámetro y la velocidad se incrementan cuando ésta cae a mayor distancia del aspersor y, por lo tanto, la energía con la que impactan las gotas sobre la superficie del suelo es mayor.

La energía de las gotas de agua por efecto de la lluvia o riego por aspersión rompe los agregados del suelo provocando la dispersión de las partículas finas que se irán movilizandopor la superficie del suelo e irán llenando los poros, consiguiendo así el llamado “efecto del sellado” y da como resultado que:

- la densidad aparente aumenta al quedar los poros llenos de partículas de limo y arcilla.
- disminuye la porosidad.
- se dificulta la infiltración del agua en el suelo, provocando encharcamiento o escorrentía superficial.
- si el suelo se seca provocaría el encostramiento.

Govers y Poesen (1988) determinaron que en suelos con alto contenido de humedad y sin cobertura vegetal, los impactos de una gota de agua inciden en el desprendimiento de las partículas del suelo por acción de la energía cinética, que provoca un esfuerzo cortante muy elevado y el consecuente colapso de la estructura del suelo. Como producto de la disgregación de las partículas, algunas son arrastradas en suspensión a zonas más bajas por la geomorfología del suelo (Proffitt y Rose, 1991).

1.6.3 Presión, descarga y grado de pulverización del chorro de salida del aspersor

Hills y Gu (1989) y Nin (2008), midieron la distribución de tamaños de gotas mediante el método de la harina para las boquillas circulares de 3,2 mm y 4,0 mm y cuadrada de 3,5 mm, determinando que conforme aumenta la presión disminuye el diámetro medio de las gotas, con valores que oscilan entre 0,7 mm y 4,6 mm y cuando disminuye la presión de trabajo del aspersor los tamaños de las gotas son más grandes.

Como el encostramiento superficial es un proceso que comprende el desprendimiento, transporte y la acumulación de partículas finas del suelo por efecto de la lluvia o riego por aspersión, cuyas gotas de agua caen de altura a veces mayores a 2 metros , para ciertos tipos de suelos como los andisoles, debe evitarse la acción de gotas grandes, por lo que es

aconsejable utilizar los riegos localizados de altas frecuencias (RLAF) y, en caso de aspersión suprafoliar, debe cambiarse gradualmente al subfoliar, con el empleo de aspersores con ángulo de salida inferior de 12 grados.

Según la presión de trabajo, los aspersores son de presión baja si operan con presiones $> 2,5 \text{ Kg.cm}^{-2}$, de presión media si operan con presiones entre $2,5-4 \text{ kg.cm}^{-2}$; y presión alta para presiones de trabajo $> 4 \text{ kg.cm}^{-2}$.

1.7 Condiciones agro-técnicas del cultivo de banano

El cultivo de banano es muy exigente a condiciones de suelo y clima. Se trata de un cultivo de alta producción, pero la degradación de los suelos, el mal uso de fertilizantes, los sistemas de riego diseñados y operados no técnicamente, y el mal manejo agronómico del cultivo, está afectando a los rendimientos productivos del mismo.

El clima ideal para el cultivo es tropical húmedo, con temperaturas de $18,5^{\circ}\text{C}$ a $35,5^{\circ}\text{C}$. Temperaturas inferiores a $15,5^{\circ}\text{C}$ retardan el crecimiento y con temperaturas de 40°C no se observan problemas con una buena disponibilidad de agua. Los requerimientos hídricos son de 30 a 40 mm/semana, dependiendo de la estación, seca o lluviosa.

Fernández (2006) indica que se requiere suelo de buena calidad de textura y estructura, con texturas de franco arenoso fino o muy fino, franco arcilloso, franco limoso y franco y además deben cumplir las siguientes condiciones:

- a.- Ser homogéneos, con profundidad efectiva mínima de 1,20 m, con napas freáticas superiores a 1,20 m y suelos con contenidos de arcilla inferiores al 40%, por la sensibilidad de las raíces a la falta de oxígeno.
- b.- Tener una buena porosidad y capacidad de retención de agua.

Soto (1991) señala que el pH ideal del suelo para el cultivo de banano puede fluctuar de 5,5 hasta 7,5, siendo muy exigente al tipo de suelo, principalmente si se trata de clones de alta productividad como los del subgrupo Cavendish. Los suelos aluviales, a pesar de su relativa heterogeneidad, constituyen la mejor opción para la siembra de banano, siempre que no sean terrenos "bajos" y se maneje adecuadamente el drenaje. En general, el perfil de los suelos bananeros debe tener buenas condiciones físicas hasta por lo menos una profundidad de 1,20 m, libre de capas compactas y nivel freático alto. El banano es un cultivo que no soporta el

encharcamiento, por lo tanto, no debe ser cultivado en zonas propensas a inundaciones o que permanezcan inundados por más de dos días.

El cultivo es exigente a requerimientos nutricionales de N, P, K, Ca y Mg y las cantidades a reponer al suelo serán las extraídas por los racimos, que son los que se retiran de la plantación, y que corresponden en este caso a: 403 g de N; 189,6 g de P; 1,7 Kg de K; 219 g de Ca y 154 g de Mg por tonelada de fruta cosechada. Considerando una plantación de 1875 plantas, la extracción de nutrientes será 6,8 Kg de N; 3,2 Kg de P; 29,3 Kg de K; 3,7 Kg de Ca y 2,6 Kg de Mg por hectárea.

Orozco y Pérez (2004) determinaron que con una fertilización de N de 200 Kg.ha⁻¹ con una tensión de humedad del suelo de 25 Kpa, se lograron los mejores beneficios económicos y que la deficiencia de agua produce efecto depresivo en el crecimiento de raíces, las cuales extraen agua a valores cercanos a la capacidad de campo (Robinson, 1995).

Acosta (2011), en ensayos efectuados con roturación e incorporando materia orgánica en cultivo de banano, logró incrementar en un 95,22% el porcentaje de raíces vivas por la descompactación del suelo, mejorando de velocidad de infiltración del agua en el mismo. Además, el porcentaje de porosidad de 30,6%, se incrementó a 41,2%, al igual que la capacidad de intercambio catiónico del 42,0% al 44,6%.



1. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la compactación del suelo bajo sistemas de riego presurizados, utilizando mejorados físicos, químicos y biológicos, y la medición de su efectividad en la mejora de los suelos del Cantón Machala, Ecuador.

2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar la curva de retención de humedad (CRH), para conocer la capacidad de retención del agua en el suelo sometido a diversas tensiones.
- Determinar el Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) y la superficie específica (SE) de los suelos de las fincas estudiadas.
- Determinar el grado de resistencia a la penetración del suelo (RPS), antes y después de la aplicación de los mejoradores en los diversos tratamientos, hasta 50 cm de profundidad, con el penetrómetro digital, para conocer su efecto.
- Evaluar la distribución de la lámina de agua dispersada por los aspersores mediante los coeficientes de uniformidad, coeficiente de variación y distribución de la intensidad pluviométrica y conocer su incidencia en la compactación del suelo.
- Evaluar los métodos físicos (roturación), químicos ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y biológicos (cobertura vegetal), como mejoradores de la compactación del suelo.



3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación geográfica del área de ensayo

Las localizaciones de las fincas seleccionadas para el desarrollo de la investigación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Localización de las fincas estudiadas.

Fincas	Provincia	Cantón	Parroquia	Coordenadas UTM
El Cisne	El Oro	Machala	El Cambio	624449,18; 9635810,89
La Fátima	El Oro	Machala	El Cambio	624622,69; 9635673,28
El Carmen	El Oro	Machala	El Cambio	625972,10; 9635109,90

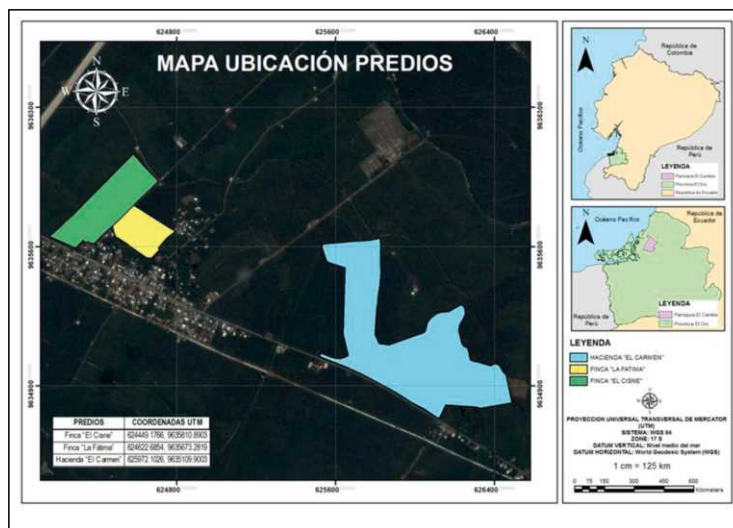


Figura 10. Localización espacial de las fincas con riego presurizado.

Datum: WGS 84, Zona: 17S

3.2 Descripción de las áreas de ensayo

En las áreas de ensayo se efectuó el plano topográfico, además del levantamiento de la red de tuberías de los sistemas de riego: La finca El Cisne cuenta con los dos sistemas de riego suprafoliar con una separación entre aspersores de 60 y entre laterales de 50 m y

subfoliar de 14 entre aspersores y 12 metros entre laterales toda con cobertura vegetal (Fig. 11).

En figura 12 se presenta el plano de la finca El Carmen con sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, el mismo que fue levantado conjuntamente con el sistema de riego, que tiene una separación de torre y laterales de 80 x 70 m. Finalmente, en figura 13, se representa el plano de la finca La Fátima con sistema de riego subfoliar y una distancia entre aspersores y laterales de 12 x 12 m, sin cobertura vegetal.

Los suelos de estas fincas son de texturas franco a franco limosas, con intensa actividad agrícola de cultivos permanentes en las llanuras.



Figura 11. Sistema de riego suprafoliar y subfoliar con cobertura vegetal, y ubicación de las áreas experimentales. Finca El Cisne.

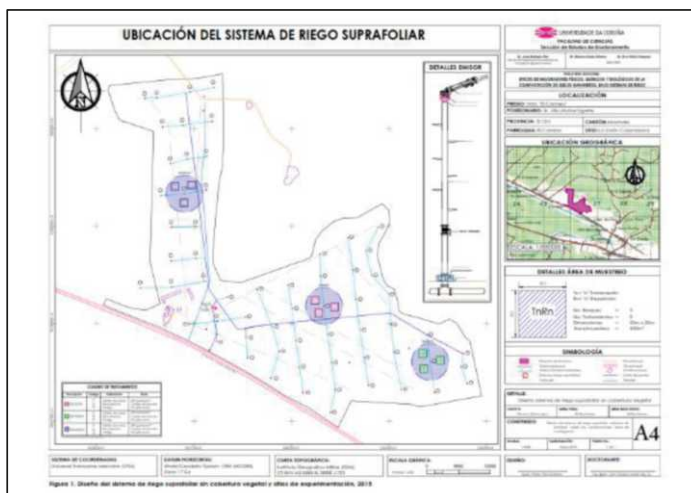


Figura 12. Sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, y ubicación de las áreas experimentales. Finca El Carmen.



Figura 13. Sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal y ubicación de las áreas experimentales. Finca La Fátima.

En cada finca se seleccionaron tres bloques y en cada bloque se efectuaron tres repeticiones. El tamaño de las parcelas en el sistema de riego suprafoliar con y sin cobertura vegetal fue de 20m x 20m y en el sistema de riego subfoliar con y sin cobertura vegetal el área de la parcela de experimentación fue de 12m x 24m (Fig.14), considerando la distancia entre los laterales y aspersores. Dentro de cada parcela, debidamente demarcadas, se consideraron 10 plantas de banano en cada repetición.



Figura 14. Dimensiones de las áreas de muestreo en los riegos subfoliar y suprafoliar de las fincas.

En los sistemas de riego suprafoliar se consideraron tres torres con su respectivo aspersor y se demarcaron, a partir de éstas, los cuatro ejes coordenados orientados de acuerdo al norte geográfico. Cada torre tiene una altura de 7 metros colocándose pluviómetros cada dos metros a lo largo del radio de la descarga para medir la intensidad pluviométrica en los cuatro ejes de la torre del aspersor y en los mismos sitios se determinó la resistencia a la penetración del suelo. Se instalaron, además, los tubos de PVC para medir el contenido de humedad con las sondas de reflectometría magnética (FDR). Así mismo, uno de estos ejes era utilizado para tomar los datos que permite calcular la curva de salida del chorro del aspersor. Lo mismo se efectuó, para el sistema de riego subfoliar.

El periodo de riego en estas fincas se inicia a mediados de mayo y concluye en enero dependiendo del inicio de la época lluviosa. Además, en cada sitio de ensayo, se perforaron calicatas, donde se tomaron las muestras que se sometieron a análisis físicos y químicos y, cercanos a ésta, se efectuaron las pruebas de infiltración del agua en el suelo.

En el tratamiento con mejorador químico se utilizó el sulfato de calcio ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con 98% de grado de pureza, aplicándose 400 g por planta en la semicircunferencia de 60 cm de radio alrededor del pseudo tallo, estableciendo 3 sectores circulares de 60° cada uno. La información fue tomada cada 15 días en las áreas de ensayo.

Como mejorador biológico se utilizó el kudzu (*Pueraria phaseoloides*), que se encontraba sembrado en toda la finca El Cisne. Los tratamientos se efectuaron en el mes de mayo del 2016 a inicios de la estación seca, monitoreándose cada 15 días, prolongándose su evaluación hasta 4 semanas posteriores a la estación lluviosa. Se estableció, por lo tanto, registro de RPS y contenido de humedad de las dos estaciones: seca y lluviosa. En el periodo de la estación seca el riego de los cultivos se efectuó a través de los sistemas de riego presurizados.

Las muestras de suelo tomadas para los diversos análisis físicos y químicos, en los tratamientos y repeticiones fueron tomadas en calicatas construidas en forma de gradas de 10 cm, hasta una profundidad de 50 cm (Fig.15). En cada grada se tomaban, con ayuda de cilindros metálicos de 5 cm de alto y 5,4cm de diámetro, las diversas muestras de suelo hasta 50 cm de profundidad. Cercanos a ésta se efectuaron las pruebas de infiltración del agua en el suelo.



Figura 15. Detalles de calicata y muestreo.

3.3 Propiedades generales de los suelos de las fincas seleccionadas

Los suelos en las fincas de investigación son de origen aluvial de orden taxonómica Inceptisoles con escaso contenido de materia orgánica dedicados a la explotación bananera, característicos de la costa ecuatoriana.

3.3.1 Análisis físico del suelo

3.3.1.1 Textura

La USDA (2014) menciona que la textura (proporción numérica -% en peso- de arena, limo y arcilla) está relacionada con la meteorización y factores como el movimiento de materiales finos, la destrucción o pérdida de minerales y la formación de sustancias no cristalinas. De acuerdo a estos criterios se ha desarrollado un método de dispersión de partículas cuya base fundamental y criterios son los de Bouyoucos. Su método se fundamenta a través de una suspensión de suelo colocada en una probeta aforada, donde se midió la densidad a una profundidad determinada la misma que va disminuyendo a medida que se sedimentan las partículas a velocidades proporcionales a su tamaño. La primera lectura de la densidad sirve de medida del contenido de limo + arcilla en suspensión.

La densidad se determinó con un hidrómetro especial denominado Hidrómetro de Bouyoucos graduado para leer directamente en gramos por litro, que está calibrado a 20°C.

La lectura del hidrómetro permite calcular los porcentajes por pesos de limos + arcillas, de arcillas y, por diferencia, se determina el porcentaje de limo.

Se pesaron 50 gramos de suelo secado al aire y tamizado a 2 mm. Una vez destruida la materia orgánica con peróxido de hidrógeno el suelo se colocó en una probeta donde se le agregó oxalato de sodio para la dispersión de las partículas dejándolo reposar 24 horas para después, en la batidora, terminar de disgregar las partículas licuándolo durante 5 minutos, vertiéndolo en la probeta aforada y enrasando con agua destilada hasta 1130 ml. Posteriormente se agitó hasta conseguir la remoción de todo el suelo sedimentado y se procedió a hacer la primera lectura a los 30 segundos y al minuto, lo que consta que las lecturas son durante 24 horas en el presente esquema.

3.3.1.2 Densidad aparente (D_a)

Se tomaron en cada área del ensayo cinco muestras a profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30cm, 30-40 cm, y 40-50 cm, con los cilindros de 5cm de alto por 5,4 cm de diámetro. Una vez obtenidas las muestras de campo en las calicatas anteriormente descritas en formas de escaleras, se calculó la D_a según lo descrito en Porta et al. (1999):

$$D_a = (P_{sh} - P_{ss}) / V_c \quad (11)$$

Peso de suelo húmedo (P_{sh})

Peso de suelo seco (P_{ss}) a 105°C

Volumen del cilindro (V_c), en cm^3

3.3.1.3 Densidad Real (D_r)

Esta variable fue determinada mediante el método del picnómetro (de 50 ml de capacidad). Se agregan 10 g de suelo seco y tamizado a 2 mm en un picnómetro previamente pesado (mb_v); posteriormente se anota el peso del picnómetro con el suelo ($mb+s$), se llena con agua destilada hasta la mitad de capacidad de éste y se agita, para luego succionar con una bomba de vacío las burbujas que se forman en su interior. Sustraídas las burbujas se enrasa el picnómetro y se obtiene su peso total ($mb+s+a$). Para determinar el volumen de desplazamiento se debe pesar, aforar el picnómetro hasta el enrase con agua destilada y obtener su masa ($mb+a$), fórmula. Para calcular la D_r se utilizó la ecuación 12:

$$Dr = \frac{[(mb+a)-mbv]x pa}{[(mb+a)-mbv]-[(mb+s+a)-(mb+s)]} \quad (12)$$

Donde,

mbv = masa del picnómetro vacío.

mb+a = masa del picnómetro más agua.

mb+s = masas del picnómetro más suelo.

mb+s+a = masa del picnómetro más suelo y más agua.

pa = densidad del agua a temperatura del ensayo.

3.3.1.4 Porosidad Total (%)

Para el cálculo del porcentaje de porosidad total se utilizó la ecuación 13:

$$Pt = (1 - Da/Dr) * 100 \quad (13)$$

Dónde:

Pt = Porosidad total

Da = Densidad aparente

Dr = Densidad real

3.3.1.5 composición textural y coloides del suelo de las fincas

Tabla 5. Composición textural y coloides del suelo de las fincas de investigación.

Fincas	Profundidad de muestreo (cm)	mg.ml ⁻¹ Nitrógeno (NH ₄)	Materia orgánica %	Carbono orgánico %	% de partículas			Clase textural
					Arcilla	Limo	Arena	
El Cisne	0-10	12,0B	2,65	1,53	15,0	34,0	51,0	Fco
	10-20	6,00B	2,13	1,23	15,2	32,4	52,4	FcoA
	20-30	9,00B	1,12	0,65	13,0	34,5	52,5	FcoA
	30-40		0,54	0,31	10,3	43,0	46,7	Fco
	40-50		0,00	0,00	12,5	38,6	48,9	Fco
El Carmen	0-10	9,00B	2,22	1,28	10,5	41,0	48,5	Fco
	10-20	9,00B	1,53	0,88	9,0	38,0	53,0	FcoA
	20-30	4,00B	0,16	0,09	4,5	44,5	51,0	FcoA
	30-40		0,00	0,00	7,0	39,0	54,0	Fco
	40-50		0,00	0,00	3,3	42,0	54,7	Fco
La Fátima	0-10	10,00B	2,51	1,45	12,0	39,0	49,0	Fco
	10-20	8,00B	1,63	0,94	9,6	39,9	50,5	FcoA
	20-30	6,00B	0,59	0,34	8,3	37,0	54,7	FcoA
	30-40		0,29	0,17	11,7	37,0	51,3	Fco
	40-50		0,00	0,00	13,0	39,0	48,0	Fco

Fco = Franco; FcoA = Franco Arenoso

En tabla 5 se presenta la composición textural y de los coloides del suelo de las fincas donde se realizaron los trabajos de campo de la presente investigación.

Puede apreciarse que el contenido de materia orgánica en las mismas va de bajo a muy bajo en todos los estratos del perfil de 50 cm, excepto en los primeros 10 cm donde su contenido es medio, sobre todo en la finca El Cisne que tiene cobertura vegetal y, por lo tanto, recibe un aporte de materia orgánica casi permanente producto de la descomposición de las hojas y ciertas raíces de la cubierta. El contenido de nitrógeno está en correspondencia directa con el contenido de materia orgánica, mostrándose bajo en todos los estratos.

La composición textural de estos suelos en casi todos sus estratos, corresponde a un suelo franco a franco arenoso en las tres fincas, ya que los contenidos de arena superan el 50%, seguido del contenido de limo, producto del origen aluvial de estos suelos.

3.3.2 Análisis Químicos del suelo

Las metodologías empleadas para el reconocimiento en laboratorio son las indicadas por la USDA (2014), para la identificación de la taxonomía de los suelos descritas por Guitán y Carballas (1986) que midieron diferentes variables como son la densidad aparente, porcentaje de porosidad, humedad del suelo, color, textura, encostramiento, contenido de materia orgánica, estructura y pH.

3.3.2.1 pH del suelo

Se midió en una suspensión de suelo en H₂O (relación suelo/solución 1:2,5), descrito por Guitán y Carballas (1986) con el uso del potenciómetro. El pH medido en agua, denominado pH actual, expresa la cantidad de H⁺ en la solución del suelo, sin tener en cuenta los iones ácidos existentes, ya que no contabiliza los fijados sobre el complejo de cambio (iones de H⁺ y Al³⁺).

3.3.2.2 Contenido de carbono orgánico

Se utilizó el método de Walkley-Black (1934) modificado por Greweling y Peech (1965). Su principio se basa en la oxidación de la materia orgánica utilizando dicromato potásico (K₂Cr₂O₇) en medio ácido, empleándose ácido sulfúrico (H₂SO₄). Se procede a la titulación del agente oxidante consumido (K₂Cr₂O₇) con el sulfato ferroso amónico Fe

(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O. La titulación es por retroceso, se valora con la sal de mohr el exceso del (K₂Cr₂O₇), que no fue necesario para oxidar la materia orgánica del suelo.

3.3.2.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se determinó la CIC por saturación con ión amonio pH 7, usando acetato de amonio (AcNH₄). El ión amonio desplaza a los cationes de cambio alcalinos sodio y potasio y los alcalino térreos calcio y magnesio de las posiciones de cambio: el exceso de amonio se lava con alcohol y, posteriormente, se realiza una segunda percolación con ClNa 1N de modo que los iones de amonio sean desplazados por el sodio. En el percolado se determinaron calcio y magnesio en el espectrofotómetro de absorción atómica y sodio y potasio por espectrofotometría de llama (Jackson, 1976). Para la determinación de la máxima capacidad de absorción (valor T) se parte del suelo saturado con amonio después del tratamiento con AcNH₄ a pH 7. Se desplaza el amonio absorbido por calcio percolando con una solución de cloruro de calcio (Mon, 2008).

Tabla 6. Composición química de los suelos de las fincas de investigación.

Fincas	Profundidad de muestreo (cm)	pH, en agua (1:2,5)	Cationes cambiables - meq.100g ⁻¹					Suma de bases (Sb)
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ¹⁺	K ¹⁺	Acidez	
El Cisne	0-10	7,8	22,20A	4,53A	0,26	2,93A	0,12	29,92
	10-20	7,3	18,87A	4,65A	0,14	1,13A	0,10	24,79
	20-30	7,0	17,86A	4,85A	0,19	0,39M	0,10	23,29
	30-40							
	40-50							
El Carmen	0-10	7,7	20,23A	4,18A	0,13	1,08A	0,10	25,62
	10-20	7,8	19,19A	4,40A	0,18	0,88A	0,08	24,65
	20-30	7,9	18,70A	5,23A	0,15	0,46A	0,01	24,54
	30-40							
	40-50							
La Fátima	0-10	7,9	21,47A	4,83A	0,15	1,15A	0,10	27,60
	10-20	8,3	19,79A	4,90A	0,15	0,91A	0,09	25,75
	20-30	8,2	20,85A	4,61A	0,25	0,61A	0,13	26,32
	30-40							
	40-50							

A= alto; M = medio

En la Tabla 6 se presentan los resultados del análisis químico del suelo de las tres fincas donde se realizaron los trabajos de campo de la presente investigación, observándose que el contenido de calcio, magnesio y potasio cambiables son altos en todos los estratos de la finca; en cambio el contenido de sodio es bajo en los estratos del perfil considerado. Su pH

va de neutro a ligeramente alcalino, evidenciándose un ligero aumento en relación con su profundidad excepto en la finca el Cisne, que tiene cobertura vegetal.

3.3.3. Análisis del Agua de riego

Para el análisis químico se utilizaron los protocolos establecidos por la USDA, y se determinó la CE, Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ en (meq.l^{-1}); CO_3^{2-} , CO_3H^- , SO_4^{2-} , Cl^- (en meq.l^{-1}), pH, RAS, PSI, % Na.

Tabla 7. Propiedades químicas del agua de riego de las fincas estudiadas.

Variables	Unidades	El Carmen	La Fátima - El Cisne
CE	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	148	395
pH	-	7,7	7,3
RAS	-	1,0	1,0
PSI	-	<1	<1
Na^+	%	49,0	26,0
Ca^{2+}	mg.l^{-1}	10,5	40,2
Na^+	mg.l^{-1}	15,1	20,4
Mg^{2+}	mg.l^{-1}	1,9	6,5
K^+	mg.l^{-1}	0,9	4,2
CO_3^{2-}	mg.l^{-1}	ND	ND
H^+CO_3	mg.l^{-1}	0,6	1,2
SO_4^{2-}	mg.l^{-1}	ND	1,0
Cl^-	mg.l^{-1}	1,2	2,0
Clase	-	C1S1	C2S1

ND=No disponible

C1S1= Aguas de salinidad baja-Aguas de contenido bajo de sodio, C2S1= Aguas de salinidad moderada-Aguas de contenido bajo de sodio.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los análisis de agua de las fuentes de abastecimiento para los sistemas de riego subfoliar y suprafoliar, notándose que la fincas El Cisne y la Fátima, utilizan agua de pozo profundo y se clasifican en la clase C2S1, interpretándose como agua de salinidad moderada, con bajo contenido de sodio; no así la finca El Carmen, que utiliza agua de canal abierto procedente del Río Jubones y es clasificada como C1S1, lo que se interpreta como agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio.

3.3.4 Superficie específica del suelo (SE)

Mon (2008) considera a la SE como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas por unidad de masa, expresada de $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. Su valor depende del tamaño de las partículas elementales que lo constituyen, así como de su composición mineralógica. Presenta correlaciones altas con el contenido en materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico; además, es inversamente proporcional al tamaño de las partículas.

Para la determinación los métodos más comunes son los químicos, basados en la absorción de gases, empleando con frecuencia el $\text{N}_2\text{O}.\text{H}_2\text{O}$ como adsorbente señalado en el método BET- N_2 . El análisis de absorción de gas es una de las técnicas más útiles y fiables para la determinación de la morfología de estructuras porosas complejas. El proceso de absorción consiste en la acumulación de una fase fluida sobre la superficie del sólido. Tal fenómeno se caracteriza por la energía de interacción entre el gas (adsorbato) y el sólido (adsorbente). La cantidad de fase fluida adsorbida disminuye al aumentar la temperatura.

Normalmente se obtiene una monocapa de moléculas adsorbidas a una presión relativa de 0.1. Esta técnica permite determinar el volumen de gas adsorbido a distintas presiones relativas, datos como la superficie específica del sólido o distribución del tamaño de poro.

El equipo utilizado fue el de adsorción SORPOMATIC 1990, con N_2 como adsorbato, y permite:

- Determinación de superficie específica a partir de $0,2 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ (utilizando N_2 como adsorbato).
- Determinación de volumen de poro a partir de $0,0001 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$.
- Determinación de radio de poro a partir de la dimensión del gas usado como adsorbato.

La superficie específica y la distribución de tamaño de poros son parámetros fundamentales para la caracterización de sólidos en lo referente a porosidad, fuerza, dureza, permeabilidad, corrosión, selectividad separadora y resistencia a tensiones térmicas. El proceso para la determinación fue el siguiente:

- Se sometieron las muestras a un proceso de desgasificación, que puede ser favorecido con un aporte de calor, con el fin de que los contaminantes adsorbidos al estar en contacto con la atmósfera sean eliminados de la superficie (agua y gases).
- Transcurridas unas horas de desgasificación, la muestra sólida es enfriada bajo alto vacío hasta temperatura del nitrógeno líquido y, a continuación, se inicia un proceso de inyección del adsorbato (N_2) en incrementos controlados de cada dosis de adsorbato inyectado, se alcanza presión de equilibrio sobre adsorbato y adsorbente y se calcula la cantidad de gas adsorbido.
- El volumen de gas adsorbido a cada presión (a una temperatura constante) define una isoterma de adsorción, de la cual se puede determinar el gas requerido para formar una monocapa sobre la muestra. Conocido el área que ocupa cada molécula de gas adsorbido, se puede calcular el área superficial de la muestra. Continuando este proceso hasta que se produzca la condensación del gas sobre los poros, se puede evaluar la estructura fina porosa de la muestra.
- Inicialmente la condensación de gas se produce sobre los poros más estrechos y, conforme aumenta la presión, va extendiéndose a otros poros más anchos, y termina por alcanzar la saturación, momento en el cual están llenos de líquido todos los poros.
- A continuación se va reduciendo gradualmente la presión sobre el sistema. La evaluación de las ramas de adsorción y desorción de estas isotermas, junto con la histéresis observada, revelan información sobre el tamaño, área y forma del poro (Mon, 2008).
- Los datos fueron procesados y evaluados siguiendo distintos métodos conocidos: Langmuir, BET, BJH, de Boer t- plot y otros evaluados. La teoría del método BET, Brunauer, Emmet, y Teller (1938) es el modelo más usado para determinar la superficie específica.
- El método BJH, Barret, Joyner y Halenda (1951), es un procedimiento para el cálculo de distribuciones de tamaño de poros a partir de las isotermas experimentales, usando el método Kelvin de llenado de poros, aplicado solo para los mesoporos y también en el entorno de los macroporos de menores dimensiones (Tabla 8).
- El contenido de SE está en función de la composición mineralógica del suelo y, en particular, del mineral arcilla, entre otros factores.

Tabla 8. Valores referenciales de superficie específica y CIC.

Mineral de arcilla	Superficie específica (m ² .g ⁻¹)	CIC(meq.100g ⁻¹)
Caolinita	5-20	3-15
Illita	100-200	10-40
Montmorillonita	300-500	100-150
Vermiculita	700-800	80-150

3.4 Contenido de humedad

Para su determinación se utiliza el método gravimétrico descrito por Guitián y Carballas (1976) en las muestras tomadas cada 10 cm, hasta una profundidad de 50 cm en los cilindros metálicos.

Estos cilindros fueron debidamente protegidos con plástico de embalaje para evitar pérdidas de humedad o de suelo al momento del traslado al laboratorio, donde se determinó el peso de suelo húmedo (psh) mediante la colación de las muestras a 105°C durante 24 horas o peso constante con el fin de determinar el peso del suelo seco.

$$\theta p = \left(\frac{Psh - Pss}{Pss} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

$$\theta_v(\%) = \theta_p \times da \quad (15)$$

θ_p = Contenido de humedad en función del peso (%)

Psh = peso del suelo húmedo (g)

Pss = peso del suelo seco (g)

θ_v = Contenido de humedad volumétrica

Da = densidad aparente (g.cm⁻³)

3.4.1 Constantes hidrofísicas

Para determinar las constantes hidrofísicas de los suelos, se utilizaron las ollas de presión y membranas de Richards. En la determinación de los contenidos de humedad los suelos fueron sometidos a tensiones de 10 Kpa y 30 Kpa con muestras sin disturbar tomadas en campo en cilindros metálicos, mientras que para determinar su punto de marchitez se utilizó tierra fina seca al aire (TFSA) tamizada a 2mm colocada en anillos de goma de 1 cm de alto y 6 cm de diámetro sometidos a 1500 Kpa de presión.



Figura 16. Pruebas de constantes hidrofísicas, ollas de presión y membranas de Richards.

En los dos casos las muestras fueron saturadas en agua destilada durante 24 horas y colocadas posteriormente sobre las membranas de resistencia de 1 bar de tensión para las dos primeras tensiones (0,1- 0,3 bar) y membranas de resistencia de 15 bares para las otras tensiones hasta 15 bar (Fig.16) durante 24 horas. Pasado este tiempo, se extraen las muestras, se pesan (peso de suelo húmedo) y se colocan en una estufa a 105°C por 24 horas (peso de suelo seco o peso constante) y se obtiene el contenido de humedad a esas tensiones construyéndose la curva de retención de humedad en esas características.

3.4.2 Intervalo hídrico óptimo (IHO)

Para determinar el IHO, fue necesario el conocimiento de la curva de retención de humedad y la resistencia mecánica a la penetración. La relación funcional entre el potencial mátrico (ψ_m) y el contenido de agua en el suelo se ajustó mediante el procedimiento descrito por Silva et al. (1994). Para ello, se escogieron muestras con estructuras inalteradas en cilindros de 5 cm de alto por 5,4 cm de diámetro y se sometieron a las siguientes tensiones: -10 Kpa y -33, -50,-100, -500 y -1500 Kpa de presión en las membranas porosas de porcelana durante 24 horas. Después de haber pesado el suelo húmedo sometido a esas diversas tensiones, las muestras se secan a 105°C y se pesan utilizándose, posteriormente, para determinar la resistencia a la penetración dentro del cilindro a una velocidad de penetración de 7 cm.min⁻¹. El cono del penetrómetro tiene en

su base 4 mm de diámetro y el ángulo de 30°. Además de la RMP se determinó el contenido volumétrico de agua y la densidad del suelo (Da Silva y Kay, 1997).

La densidad del suelo (D_s) y el contenido de humedad (Θ) fueron calculados después de obtener la masa de suelo seco a 105°C durante 24 horas. La curva de retención de humedad (CRH) fue obtenida de las mismas muestras utilizadas para medir la RPS. La humedad de las muestras fue cuantificada sin alteración de la estructura del suelo en las pruebas de penetración y la curva de resistencia del suelo fue ajustada por medio de un modelo no lineal propuesto por Busscher (1990) según la ecuación 16.

$$RMP = a \times \Theta^b \times D_s^c \quad (16)$$

Donde a, b y c, son parámetros de ajuste.

El IHO, se determinó como la diferencia entre el límite superior e inferior del contenido de agua en el que ocurren las restricciones que se considera los parámetros físicos. El límite superior es el menos a CC o porosidad del aire de 10% y el límite inferior más alto a la resistencia de penetración 2,0 MPa o punto de marchitez permanente (PMP).

Se utilizaron 60 cilindros metálicos de 5 cm de alto y 5,4 cm de diámetro con la base inferior cerrada y perforada. En dichos cilindros se colocaron muestras de los estratos de suelo de cada 10 cm, hasta una profundidad del perfil de 50 cm.

En cada cilindro se realizó la compresión de las muestras (secas y tamizadas a 2 mm) con aparato construido como émbolo, por capas, para asegurar la homogeneidad de la densidad de suelo (d_s) lograda. Se obtuvieron 5 grados de compactación: 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 y 1,5 g.cm⁻³ variando el peso seco de suelo por unidad de volumen. Luego se secaron las muestras durante 3 días a 60°C. Posteriormente, se realizó el humedecimiento de las muestras hasta lograr el contenido hídrico correspondiente a θ_{cc} (capacidad de campo), manteniéndolo por pesada hasta el final del ensayo.

Al inicio, luego del primer humedecimiento y finalizado el ensayo, se midió la altura de las columnas de suelo para estimar el cambio volumétrico y, en consecuencia, cambios en la δ_s , tomando la densidad de suelo final (δ_{sf}). Con equipo de Richards se determinaron las constantes hídricas CC y PMP, a -0,10 Kpa; -33 kpa; -500 Kpa y -1500 kpa. Se tomó δ_{sf} para expresar los datos volumétricamente (θ_{cc} y θ_{PMP}).

En los cilindros sin cultivo (se mantuvieron a temperatura ambiente dentro del laboratorio) desde θ_{cc} y en cinco diferentes contenidos hídricos (θ) y hasta aproximadamente $\theta = 15\%$, se midió la RMP, con un penetrómetro de laboratorio.

Con el dato de densidad real de cada suelo y la d_s de cada capa, se calculó la porosidad total, considerada igual al contenido hídrico a saturación (θ_s), para determinar el contenido hídrico relativo (θ_r) de cada medición de RMP, y así los coeficientes de la ecuación potencial - $RMP = a (\theta/\theta_s)^b$ - (Wilson et al., 2006). Se determinó el IHO para cada tratamiento de acuerdo a Da Silva et al. (1994), a partir de los siguientes límites del intervalo, expresados en forma volumétrica: $\theta_a = 10\% \theta_s$, $\theta_{rmp} = \theta$ cuando la RMP = 2 MPa, θ_{cc} (CC) y θ (PMP). Para cada δs el límite superior del IHO se considera al menor valor entre θ_a o θ_{cc} , mientras que el límite inferior está determinado por el mayor valor entre θ_{rmp} y θ_{PMP} .

3.4.3 Determinación del contenido de humedad a través de la sonda de capacitancia (FDR)

Se efectuaron las lecturas (cada 10 días) de los contenidos de humedad usando el equipo portátil Diviner 2000 (FDR)

A.- Instalación de los tubos PVC, para la medición con las sondas de capacitancia Diviner 2000 (FDR), en total 10 para cada finca

Para estimar la humedad en el suelo, se instalaron los tubos de PVC de 52 mm de diámetro interno, georeferenciándolos en diversos puntos dentro de cada finca en un total de 30 en las tres fincas con una longitud de 1m cerrados en la parte inferior por tapón cónico y en la parte superior se colocó la caperuza (tapa), manteniéndose fijo durante todo el ensayo.

Materiales para la instalación:

- Barreno del mismo diámetro del tubo de 5,4 cm.
- Tubos de PVC de 5,5 cm y sus respectivos complementos (cerrado en la parte inferior del tubo y tapa (caperuza) en su parte superior).

Para la instalación se siguió el siguiente procedimiento:

- Perforación del suelo con un barreno de 5,4 cm de diámetro hasta un metro de profundidad.
- En el extremo inferior del tubo lleva un tapón en forma de cono y en el extremo superior del mismo se colocó la caperuza o tapa para un cierre hermético.

B.- Toma de los datos de humedad

Se introduce la sonda Diviner 2000 (Fig. 17), lentamente y a una velocidad constante ($70 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), registrándose lecturas cada 10 cm, tanto el ingreso como a la salida, obteniéndose un valor promedio de las lecturas.



Figura 17. Toma de datos con la sonda FDR.

El equipo Diviner 2000, facilita 2 opciones básicas de visualización de resultados. La primera indica los milímetros de agua que existe en cada sección de 10 cm de profundidad de suelo (SINGLE), en donde en el eje x aparecen las fechas de medición y el eje y los % de humedad en esa sección. Como segunda opción se pueden mostrar los datos de humedad correspondientes a todo el perfil; es decir sumados (SUMMED), por lo que el valor que aparece en la pantalla corresponde a la suma de los contenidos de humedad de todos los intervalos o secciones.

El equipo permite visualizar la información histórica registrada, importante para evaluar el comportamiento de la humedad a través del tiempo y el efecto que han producido los aportes y pérdidas de agua en el régimen hídrico de los suelos.

Toda la información almacenada en el Diviner 2000 puede ser transferida a un ordenador y se procesan los datos de humedad de suelo mediante el software IRRImax© y una planilla de Excel, obteniéndose los resultados estadísticos, gráficos y otros (Mestas, 2011).

C.- Calibración de la sonda FDR

Las ecuaciones de calibración de la sonda DIVINER 2000, son derivadas del análisis de regresión entre las medidas de SF (frecuencia escalada) frente a los contenidos volumétricos de humedad (Θ_v) %. El fabricante proporciona una ecuación por defecto, que se puede emplear si desea seguir la dinámica de humedad del suelo. Sin embargo, se puede determinar una ecuación para cada tipo de suelo que, en muchos casos, no diferencia de los datos obtenidos entre las dos ecuaciones.

Se debe normalizar la sonda, obteniendo las frecuencias normalizadas (SF) según la ecuación 17.

$$SF = (Fa-Fs) / (Fa-Fw) \quad (17)$$

Dónde:

Fa = Lectura realizada por el Diviner 2000 en un tubo PVC al aire.

Fw = Lectura realizada por el Diviner 2000 en un tubo de PVC sumergido en agua.

Fs = Lectura en un tubo de PVC en el suelo.

Se efectuaron estimaciones de la humedad volumétrica con el Diviner2000, a profundidades de 10, 20, 30, 50, 50 y 60 cm y, simultáneamente, a las mismas profundidades se tomaron muestras de suelo en forma escalonada para determinar en laboratorio su contenido volumétrico de humedad. Se representa, en el eje x, los contenidos volumétricos de agua de las muestras y en el eje y, los valores de frecuencia normalizada, obtenidos de la sonda Diviner 2000. A través de esta gráfica se obtiene una ecuación de calibración y mediante análisis de regresión lineal se obtendrá la ecuación 18.

$$SF = A (\Theta_v)^B + C \quad (18)$$

Dónde:

SF = Frecuencia escalada o normalizada (adimensional).

A, B, C = Coeficientes de calibración, dependientes del tipo de textura del suelo.

Θ_v = Contenido volumétrico de humedad del suelo, en %.

3.4.4 Tensiómetros

El tensiómetro se calibró con agua desgasificada hasta por encima del punto de inserción del vacuómetro. Se introduce la cápsula en agua, para establecer el cero del tensiómetro; al mismo tiempo se hace vacío varias veces con una bomba de succión para purgar el aire que pudo quedar atrapado.

Para la instalación, con ayuda de barreno de diámetro de 5 cm, se efectúa una perforación a una profundidad de acuerdo a la longitud del tensiómetro, la tierra extraída se pasa por un tamiz de 2mm, se mezcla y se forma una pasta saturada que se coloca en el fondo de la perforación, donde se introduce la cápsula; el resto se llena con suelo, cuidando de no dejar espacios libres entre la perforación y el tensiómetro.

3.5 Resistencia a la penetración en el suelo (RMP)

Mediante un penetrómetro digital marca FIELDSCOUT modelo: SC-900, se midió, cada 2,5 cm de profundidad, la resistencia a la penetración en los sistemas de riego y en cada uno de los tratamientos a distancias parciales de 2 m en el radio de descarga del emisor en sus cuatro ejes a partir de la torre a una velocidad de 7 cm.min⁻¹ (Tabla 9).

Los datos obtenidos en campo se procesaron en una base de datos diseñado por el software del mismo equipo, la cual agrupa los datos en estratos que han sido registrados en el data logger del equipo, mediante el puerto RS-232 del equipo y la PC, se descargaron los datos, para el posterior procesamiento en una hoja de cálculo considerando las profundidades en estudio.

Para interpretar los datos obtenidos se utilizó la escala dada por Zerpa et al. (2013), que toma en consideración la condición del suelo para el desarrollo de la rizosfera, de acuerdo el grado de resistencia edáfica.

Tabla 9. Escala de interpretación de la resistencia a la penetración de la capa edáfica.

RPS (MPa)	Condición
≤ 0,9	Sin restricciones, buenas condiciones
0,9 – 1,4	Leves restricciones
1,4 – 2,0	Moderadas a severas restricciones
> 2,0	Restringido para el enraizamiento, malas condiciones

3.6 Índice de encostramiento

El índice de encostramiento fue calculado de acuerdo al descrito por la FAO (1980) modificado por Comerma et al. (1992).

$$I.E = \frac{1,125 \times Lm(\%)}{Arc(\%) + 10 \times M.O(\%)} \quad (19)$$

Dónde:

I.E.= Índice de encostramiento.

Lm = % de Limo (2 - 20 μm).

Arc = % de arcilla (< 2 μm).

MO = % de materia orgánica.

Variación del índice de encostramiento (IE) (Lobo y Pulido, 2006)



3.7 Índice de estabilidad estructural

Este índice fue calculado según lo propuesto por Pieri (1995) ya que, además de considerar el porcentaje de materia orgánica, toma en cuenta los contenidos de limo y arcilla, mediante la ecuación 20 y su interpretación se presenta en la Tabla 10.

$$IEE = \% M.O (\%Limo + \% Arcilla) \times 100 \quad (20)$$

IEE = Índice de estabilidad estructural

Limo (2- 20 μm)

Arcilla (< 2 μm)

M.O = % de Materia Orgánica.

Tabla 10. Índice de estabilidad estructural (IEE)

Índice de estabilidad estructural (IEE)	Interpretación
< 5	Suelos degradados
5 y 7	Suelos con alto riesgo a la degradación física por compactación
7 y 9	Suelos con moderado riesgo a la degradación
>9	Suelos estructuralmente estables

3.8 Ensayos de compactación inducida en laboratorio (Pruebas Proctor)

Este método estuvo basado en la determinación de las densidades de varias muestras, compactadas en idénticas condiciones, pero con contenidos de humedad diferentes. El ensayo abarcó los procedimientos de compactación usados en el laboratorio, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 ó 6 pulgadas (101,6 ó 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulgadas (457 mm), produciendo una energía de compactación de 56 000 lb-pie.pie⁻³ (2 700 k-m.m⁻³).

La muestra requerida para el Método Proctor estándar es de, aproximadamente, 35 libras (16 kg), pasada por un tamiz No.4 (4,75 mm) (Fig.18). El procedimiento es el siguiente:

1. Determinar el contenido de humedad que tiene el suelo en el momento que se toma su muestra.
2. Secar los 15 kilogramos de suelo en la estufa durante 24 horas.
3. Colocar 5 muestras de suelo que contengan 3000 gramos del mismo en sus respectivos recipientes.
4. Someter las muestras a diferentes contenidos de humedad, 1, 2, 3, 8 y 10 %, respecto a los 3000 gramos, que determina 30, 60, 90, 240 y 300 gramos o ml de agua que se aplicó a la muestra hasta homogenizarla, dependiendo la textura del suelo.
5. Extraer dos muestras de 100 gramos por cada tara con un total de 10 submuestras y determinar su contenido de humedad.
6. Pesar el molde y calcular el volumen.

7. Colocar el suelo con distintos contenidos de humedad en los moldes, en forma fraccionadas (5 capas) y en cada una de ellas compactarla con el martillo compactador dando 25 golpes deslizado a una altura de 45 cm.
 8. Terminada la compactación, se enrasa y se determina su contenido de humedad.
- (Fig. 18)



Figura 18. Prueba Proctor en compactación inducida del suelo.

3.9 Pruebas de infiltración

Para determinar la infiltración de agua en el suelo se utilizaron anillos o cilindros infiltrómetros de campaña, efectuando tres repeticiones por tratamiento. Se trabajó con una batería de 6 anillos, con las siguientes características y procedimiento (Fig. 19):

1. Anillo infiltrómetro interno de 25 cm de diámetro y 50cm altura.
2. Anillo externo de 50 cm de diámetro y 25cm de altura.
3. Colocar agua en el cilindro exterior a una profundidad de, por lo menos, 5 cm y mantener un nivel durante la prueba.
4. Con un plástico/tela en el fondo del cilindro interior, para protección contra el golpe de agua, llenar el cilindro a una profundidad de 10-12 cm, lo más rápidamente posible.

5. Quitar del cilindro interior el plástico o tela.
6. La medida inicial debe realizarse rápidamente, para minimizar error de infiltración durante el tiempo inicial. Debe colocarse previamente una cinta métrica adherida al cilindro para efectuar las lecturas.
7. Registrar la lámina infiltrada y el tiempo correspondiente.
8. Efectuar las lecturas a intervalos periódicos. Los intervalos iniciales pueden ser de 1, 2, 5, 10 minutos al comenzar la prueba y luego de la primera hora se puede alargar estos intervalos cada 30-60 minutos.
9. Mantener el nivel de agua de 7-12 cm durante la prueba. Cuando se agrega agua hay que cerciorarse de registrar antes y después de llenar. Por diferencia en niveles se puede calcular el total de agua infiltrada a cualquier tiempo.
10. La prueba dura 120 minutos.

Con los datos obtenidos y procesado con una hoja electrónica, se determinó infiltración acumulada y la velocidad de infiltración.

Según Jaramillo (2002) cuando velocidad de infiltración se vuelve constante se le denomina infiltración básica. Esta tendencia a ser constante refleja el movimiento del agua en el suelo saturado por lo que puede hacérsela a la conductividad hidráulica. Se determinó mediante la ecuación de Kostiakov (Tabla 13).

A.- Infiltración acumulada (Icum)

$$I_{cum} = A T o^B \quad (21)$$

$$B = \frac{n(\sum X_i \cdot Y_i) - \sum X_i \cdot \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (22)$$

$$A_o = \frac{\sum Y_i - B \sum X_i}{n} \quad (23)$$

A=Antilogaritmo de A_o

B.-Velocidad de infiltración (I)

$$I = a T o^b \quad (24)$$

$$b' = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \cdot \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (25)$$

$$a_o = \frac{\sum Y_i - b \sum X_i}{n} \quad (26)$$

a = antilogaritmo de a_0

Donde “I”, es la infiltración instantánea o considerada en un momento determinado, “ T_0 ” el tiempo que se aplica el agua en el suelo, “a” y “b” constantes, donde “a” es la velocidad de infiltración, durante el intervalo inicial ($T=1$) y “b” un exponente negativo que va entre 0 y -1 que corresponde a la pendiente de la curva e indicando como la velocidad de infiltración disminuye con el tiempo. Según la FAO existe un rango o tasa de infiltración básica para diversos tipos de suelo (Tabla 11).

Tabla 11. Rangos de infiltración básica según la textura.

TIPO DE TEXTURA DE SUELO	INFILTRACION BASICA, mm.h ⁻¹
Arenoso	> 30
Franco arenoso	20-30
Franco	10-20
Franco arcilloso	5-10
Arcilloso	1-5



Figura 19. Pruebas de infiltración en campo.

3.10 Mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación del suelo

3.10.1 Mejoradores físicos

Como mejorador físico, se utilizó la roturación del suelo con la ayuda de un instrumento metálico (herculizador) con cuatro dientes de una longitud de 0,31 m separados 10 cm. Se efectuaron cuatro pases a lo largo del radio de acción de 60 cm alrededor del retorno, en los tres sectores circulares de 60° (Fig.20).

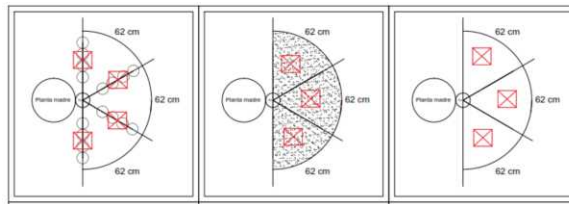


Figura 20. Zonas de roturación con el subsolador manual (hércules).

3.10.2 Mejoradores químicos

En el tratamiento con mejorador químico se utilizó el sulfato de calcio ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con 98% de grado de pureza, aplicándose 400 g. por planta en la semi-circunferencia de 60 cm de radio alrededor del pseudotallo (Fig.21), estableciendo 3 sectores circulares de 60° cada uno. La información fue tomada cada 15 días en las áreas de ensayo.



Figura 21. Aplicación del sulfato de calcio ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

3.10.3 Mejoradores biológicos

Como mejorador biológico, se seleccionó una finca con cultivo de banano (Fig.22), muy cercano a las otras fincas, que tiene una cubierta vegetal de más de 5 años de Kudzu (*Pueraria Phaseoloide*), una leguminosa perenne de crecimiento rastrero, planta voluble y trepadora, sistema radicular fuerte y profundo que puede alcanzar más 1,50 m, se desarrolla en pH 3,5- 5,5, puede aportar de 50-100 Kg N/Ha/año.



Figura 22. Cobertura vegetal con Kudzu (*Pueraria phaseoloide*).

3.11 Evaluación de los sistemas de riego presurizados

Olalla (1993) definió los principales parámetros empleados en todos los procedimientos de evaluación en el campo de los sistemas de riego, tal y como se refiere a continuación.

3.11.1 Intensidad pluviométrica (Ip)

El conocimiento del patrón de distribución del agua a lo largo del radio de mojado de los aspersores es de vital importancia para caracterizar la distribución y uniformidad de las coberturas de riego por aspersión. En condiciones de viento en calma esta distribución es circular e igual en todas las direcciones alrededor del aspersor. Para ello, se colocaron líneas pluviométricas a lo largo de los 4 radios de descarga en direcciones Norte, Sur, Este y Oeste alrededor del aspersor y buscando la hora en la que la velocidad del viento fuese menor a $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, debido a que a mayores velocidades los datos no son fiables.

Se receiptó la lluvia en pluviómetros (cilindros de 100 cm³) ubicados en cuadros ejes a distancias parciales de cada 2 metros, a lo largo del radio de descarga del chorro (Fig. 23).

La intensidad pluviométrica se calculó según la ecuación 27.

$$I_p = Q \times 1000 / S_e \times S_l \quad (27)$$

Dónde:

I_p = Intensidad pluviométrica en mm.h⁻¹.

Q = Descarga del aspersor en m³.h⁻¹.

S_e = Separación entre emisores, expresado en metros.

S_l = Separación entre laterales, expresado en metros.



Figura 23. Prueba de intensidad pluviométrica (I_p).

3.11.2 Uniformidad de distribución (DU)

La uniformidad de distribución es un indicador de la altura del agua infiltrada en toda la finca. Se calculó conforme la ecuación 28.

$$DU = \frac{\text{Altura de agua infiltrada en el 25\% del area menor regada}}{\text{Altura media de agua infiltrada en la parcela}} \quad (28)$$

3.11.3 Coeficiente de uniformidad (CU)

El CU de Christiansen es una representación estadística de la uniformidad del riego por aspersión, expresada en porcentaje. Para su cálculo se usó la ecuación 29.

$$CU = \left[1 - \frac{\sum |x_i - x_m|}{\sum x_i} \right] \cdot 100 \quad (29)$$

X_i = volúmenes de los datos pluviométricos, cm^3

X_m = Volúmenes promedio de los datos pluviométricos, cm^3

Heermann y Hein (1968), citado por Olalla (1993), modificaron este coeficiente de uniformidad para evaluar los sistemas de riego central, donde cada pluviómetro representa una corona circular de área creciente a medida que se aleja del centro de pivot (Tabla 14).

$$CU = \left[1 - \frac{\sum D_i \left| C_i - \frac{\sum C_i * D_i}{\sum C_i} \right|}{\sum C_i D_i} \right] * 100 \quad (30)$$

Siendo:

n = Numero de pluviómetros.

C_i = Cantidad recogida por el pluviómetro i (con i variando entre 1 y n)

D_i = Distancia del centro pivot (riego suprafoliar) o también, posición ocupada por el pluviómetro i , con un valor de 1 para el más cercano al centro, 2 al siguiente y así hasta un valor n para el más alejado.

El utilizar como referencia la media del 25% de los valores más bajos implica que un octavo del área regada recibe menos agua que la mínima deseada. Olalla (1993), establece los siguientes valores de UD y CU para ciertas características de los cultivos (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de UD y CU para ciertas características de los cultivos.

UD	CU	Características del cultivo
80%	87%	Cultivos con alto valor, con sistema radicular superficial
70-80%	81-84%	Cultivos con mediana profundidad radicular, suelos de textura media
60-70%	75-81%	Cultivos de huertos, forrajes y cultivos en zonas lluviosas

En tabla 13, se presenta el rango de valores probables de CU y UD, según Keller (1990), para varios sistemas de riego por aspersión.

Tabla 13. Valores referenciales de CU y UD, para varios sistemas de aspersión.

Tipo	UD = ED90	CU = ED80
Laterales móviles	60 a 80%	70 a 86%
Laterales fijos	60 a 85%	70 a 88%
Cañones de riego	50 a 60%	60 a 75%

3.11.4 Determinación del coeficiente de variación de la descarga de los aspersores (CV)

Para el cálculo del coeficiente de variación de la descarga de los aspersores se utilizó la ecuación 31.

$$CV\% = \frac{100}{x} \times \sqrt{\frac{\sum(x^2) - \frac{\sum(x_i)^2}{n}}{n}} \quad (31)$$

Dónde:

X_i = Medida de cada una de las lecturas de los pluviómetros, mm.

n = número de pluviómetros.

Para interpretar los resultados obtenidos se utiliza la información incluida en la Tabla 14.

Tabla 14. Rango de coeficiente de variación y su interpretación

COEFICIENTE DE VARIACION (CV) %	INTERPRETACIÓN
< 25	Baja variación
25-50	Moderada
>50	Alta Variación

3.11.5 Evaluación del índice de grosor de la gota (IG)

El grosor de las gotas se evalúo con el índice de grosor (IG). Para calcular el IG se mide la presión (p) en Kg.cm⁻² en cada uno de los aspersores que fueron seleccionados para la evaluación de la uniformidad de distribución y también se medirá el diámetro (d) de las boquillas en mm. Se calculó mediante la ecuación 32.

$$IG = 12.85 \times \frac{P^{1.3}}{d} \quad (32)$$

Es recomendable que el índice de grosor esté entre 7 y 17. Valores menores que 7 indican gotas demasiado gruesas, y valores mayores que 17 indican gotas demasiado finas. La distribución del agua se puede ver afectada negativamente con tamaños de gotas extremas. Solo se justifican valores de 7 en condiciones de vientos fuertes.

3.11.6 Energía cinética de las gotas emitida por un aspersor

La energía cinética de las gotas emitida por un aspersor fue evaluada mediante la fórmula dada por Bautista et al. (2008) siguiendo la ecuación 33.

$$E_c = 1/8 \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot V_o \quad (33)$$

E_c = Energía cinética en Julios

d = Diámetro de la gota en metros

ρ = Densidad absoluta del agua en Kg.m^{-3}

V_o = Velocidad de la gota a la elevación cero en m.s^{-1} .

3.12 Diseño experimental

En el presente trabajo de investigación, se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar, con arreglo multifactorial de tres tratamientos con tres repeticiones, resultando un total de 57 unidades experimentales. Cada unidad experimental estará formada por el diámetro de mojado del emisor (supra y sub foliar).

Para estimar la incidencia de las propiedades físicas que afectan a la compactación del suelo, se empleó el modelo matemático representado en la ecuación 34.

$$Y_{ij} = U + T_i + b_j + E_{ij} \quad (34)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, T$

$j = 1, 2, 3, \dots, b$

Y_{ij} = Representa la unidad experimental.

U = Promedio general del ensayo.

T_i = Efecto de los tratamientos.

B_j = Efecto de los bloques.

E_{ij} = Error experimental.

Para cumplir con los objetivos propuestos se analizaron las siguientes variables:

- Contenido de humedad del suelo en laboratorio, expresado en %
- Densidad aparente y densidad real, expresadas en unidades de g.cm^{-3} .
- Superficie específica, $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$.
- Porosidad total, expresada en porcentaje (%).
- Infiltración del agua, expresada en $\text{mm} \cdot \text{hora}^{-1}$.

- Resistencia a la penetración, expresada en Kpa.
- Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).
- Porcentaje de aireación (Pa).
- Índice de humedad óptimo (IHO), expresada en %.
- Densidad de suelo crítica (DscIHO), expresada en g.cm^{-3} .
- Resistencia a la compactación del suelo en laboratorio, prueba Proctor, medida en Kpa.
- Contenido de humedad por medio de sondas de capacitancia (FDR), expresado en %.

Además de estas variables a ser analizadas se registraron parámetros que permitieron evaluar el sistema de riego por aspersión utilizado en las fincas agrícolas motivo de esta investigación. Dichas variables se relacionan a continuación:

- Intensidad pluviométrica de los aspersores, expresada en mm.h^{-1} .
- Presión de trabajo y descarga de los aspersores, en Kpa.
- Curva de descarga del aspersor, expresada mediante una ecuación polinomial.
- Diámetro medio de las gotas de lluvia del aspersor, en mm.
- Energía de impacto de la gota del aspersor, en Kj.m^{-2} .

El análisis estadístico se realizó bajo el esquema de análisis de varianza (ANOVA). A los factores que evidenciaron diferencia estadística, se le aplicó la prueba de Tukey al 5% de significación para discriminar las medias, utilizando el software estadístico SPSS.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los ensayos efectuados en las fincas seleccionadas, incluyendo una descripción del perfil del suelo, el análisis de las propiedades físicas, la medición del grado de compactación, el porcentaje de humedad y algunos parámetros de evaluación de los sistemas de riego. Los suelos de las áreas objeto de esta investigación son el resultado de la sedimentación de material aluvial de los ríos que circundan al cantón Machala, producto de su desbordamiento y también de la interacción de geoformas, el clima, el material parental y los organismos. Por lo tanto, cuentan con propiedades químicas y físicas específicas, condiciones determinantes en su uso y manejo.

Las propiedades físicas, fueron caracterizadas en el campo y en el laboratorio, mediante pruebas y cálculos matemáticos. Por su parte, las propiedades químicas del suelo fueron caracterizadas mediante diversos análisis que incluyeron el contenido de materia orgánica por el método de Walkey Black, pH en relación agua-suelo 1:2,5, y los niveles de bases cambiables como Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ por el método del acetato amónico.

4.1 Textura

En las Tablas 15 y 16 se observa la composición textural de los suelos en estudio, evidenciándose que el mayor porcentaje de arcilla se encuentra en el horizonte de 0-10 cm en los sistemas de riego subfoliar, mientras que el suprafoliar este mayor contenido está en el estrato de 10 – 20cm excepto en el tratamiento con cobertura vegetal, donde aparece en el horizonte de 0 – 10 cm. El contenido de limo en el sistema de riego subfoliar y suprafoliar en casi todos los tratamientos tiene una tendencia a aumentar en el perfil desde la superficie hasta el estrato de 40- 50 cm, menos en el tratamiento con cobertura vegetal donde el contenido de limo presenta una alta variabilidad en los dos sistemas de riego y no permite evidenciar una tendencia clara.

En lo referente al contenido de arena, en todos los tratamientos en fincas con sistema subfoliar tiene una tendencia a disminuir desde el primer al último estrato. Diverso sucede con el riego suprafoliar, donde los contenidos en arena aumentan desde el primer al último estrato dentro del perfil del suelo. En cambio, en tratamiento con cobertura vegetal presenta una alta variabilidad, al igual que sucedía en el caso del limo, que puede deberse

al origen aluvial de estos suelos: la velocidad de sedimentación de partículas en medios líquidos determina sus contenidos, tendiendo las partículas finas a situarse en la superficie (Henaó, 2010). Este comportamiento de la textura puede deberse también a la degradación de la estructura por el impacto de las gotas de agua: al caer de determinada altura en los sistemas suprafoliare, la energía cinética de una gota produce la ruptura de los agregados y la reorganización de las partículas finas en la superficie del suelo.

En los suelos con cubierta vegetal de Kudzu, la distribución de partículas en el perfil puede estar condicionada por el sistema radicular de esta planta, que alcanza profundidades de más 50 cm: al cumplir su ciclo fisiológico, las raíces se necrosan, y tras la descomposición de la materia orgánica aumenta la porosidad, lo que puede facilitar la eluviación de arcilla y otras partículas finas.

Tabla 15. Composición textural de los suelos en sus diversas capas con los sistemas de riego subfoliar, en las áreas de investigación.

Estratos (cm)	T0:Testigo			T1:Roturación			T2:Yeso Agrícola			T3:Cob. Vegetal		
	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim
0-10	42,0	18,0	40,0	56,0	14,0	30,0	54,0	15,0	31,0	42,5	12,0	45,5
10-20	43,0	12,5	44,5	53,5	12,5	34,0	52,0	13,5	34,5	45,0	12,5	42,5
20-30	40,0	6,5	53,5	46,0	11,0	43,0	44,0	12,0	44,0	47,0	6,0	47,0
30-40	32,0	8,0	60,0	35,0	9,5	55,5	41,5	3,5	55,0	49,0	7,0	44,0
40-50	28,5	7,5	64,0	37,0	4,0	59,0	44,0	10,5	45,5	44,0	7,0	49,0
Media	37,1	10,5	52,4	45,5	10,2	44,3	47,1	10,9	42	45,5	8,9	45,6
CV%	17,43	45,55	19,31	20,76	37,75	28,86	11,74	40,95	22,67	5,60	34,72	5,56
Clase	Franco limoso			Franco arenoso			Franco			Franco arenoso		

1/ Clase textural USDA

Ar=Arena, Arc=Arcilla, Lim=Limo

Tabla 16. Composición textural de los suelos en sus diversas capas con los sistemas de riego suprafoliar, en las áreas de investigación.

Estratos (cm)	T0:Testigo			T1:Roturación			T2:Yeso Agrícola			T3:Cob. Vegetal		
	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim	Ar	Arc	Lim
0-10	61,0	2,0	37,0	61,0	9,0	30,0	61,0	9,0	30,0	45,0	11,0	44,0
10-20	68,0	7,0	25,0	64,0	13,0	23,0	62,0	11,0	27,0	46,0	8,0	46,0
20-30	79,0	4,0	17,0	70,0	9,0	21,0	68,0	8,0	24,0	45,0	5,0	50,0
30-40	63,0	3,0	34,0	76,0	7,0	17,0	76,0	7,0	17,0	58,0	5,0	37,0
40-50	55,0	2,0	43,0	78,0	3,0	19,0	75,0	7,0	18,0	55,0	5,0	40,0
Promedio	65,2	3,6	31,2	69,8	8,2	22,0	68,4	8,4	23,2	49,8	6,8	43,4
CV%	13,82	57,60	32,87	10,55	44,31	22,73	10,27	19,92	24,27	12,49	39,46	11,70
Clase	Franco limoso			Franco arenoso			Franco			Franco arenoso		

1/ Clase textural USDA

Ar=Arena, Arc=Arcilla, Lim=Limo

Los resultados señalan que, a pesar de existir una discontinuidad de componentes texturales entre las diversas capas consideradas, no hay una diferencia significativa en todos sus horizontes (Fig.24 a, b, c, d). De ahí que las clases texturales predominantes son el franco arenoso a franco. Es importante resaltar que los contenidos de arcilla en el estrato

de 10- 20 cm aumenta en todos los tratamientos excepto en el que presenta cobertura vegetal, donde los valores son heterogéneos, y tienen influencia directa sobre el movimiento y la disponibilidad de la humedad y nutrientes del suelo, la aireación y la resistencia a la penetración (FAO, 2000).

El limo en los suelos con sistemas de riego subfoliar sin cobertura aumenta en un 3% en la capa de 10-20cm en comparación con el valor en superficie. Lo mismo ocurre en el riego suprafoliar, donde el aumento fue de un 5,5% hasta la capa de 20-30cm, mientras que en los suelos con cobertura y sistema de riego subfoliar en incremento del limo fue de un 25,2%; en la capa de 20-30cm y en el suprafoliar el incremento fue de tan solo 2,76%, debido probablemente al incremento de la materia orgánica que conlleva un incremento de porosidad y por lo tanto eluviación de las partículas más finas. La mayor variabilidad de datos se observa en el contenido de arcilla en el testigo con un 45,55% y 57,60%, y la menor en el tratamiento con cobertura con un 5,56% y 11,70% en su contenido de limo, debido al efecto amortiguador de la cobertura sobre la incidencia de la energía de las gotas de agua en los sistemas de riego presurizado subfoliar y suprafoliar respectivamente.

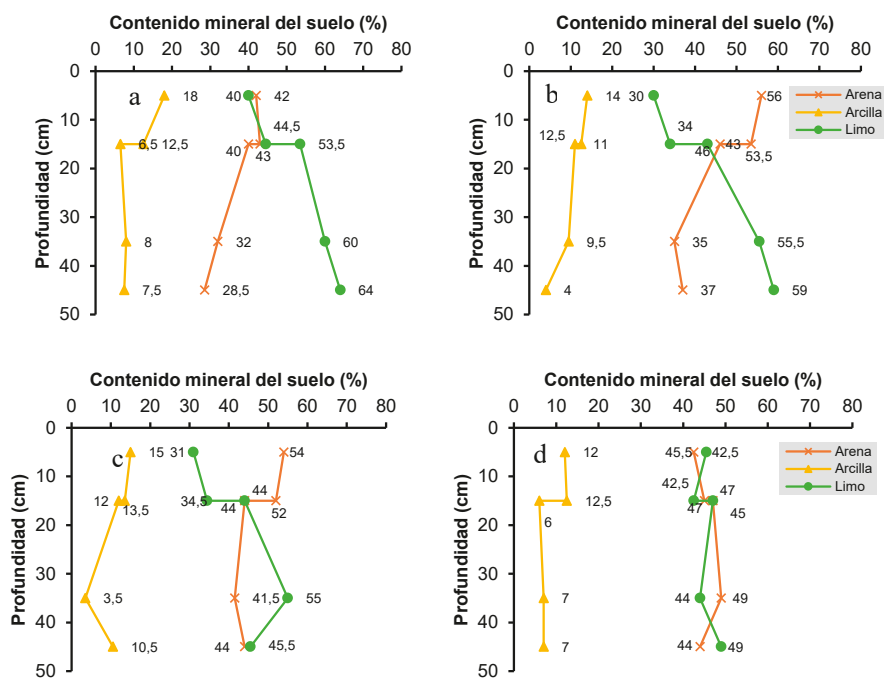


Figura 24. Distribución del contenido mineral del suelo en un sistema de riego subfoliar, a) T0: Testigo, b) T1: Roturación, c) T2: Yeso agrícola, d) Cobertura vegetal.

4.2 Densidad aparente

La densidad aparente presentada (Tabla 17) considera las 5 capas de 10cms. El coeficiente de variación fue en todos los casos menor a 5%, y sus valores no tienen diferencias significativas entre tipo de cobertura y sistema de riego. Sin embargo, se puede resaltar que con el sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal existe un ligero aumento de la densidad de 1,38 g.cm⁻³, en la capa de 0-10 cm a 1,46 g.cm⁻³ en la capa de 10- 20 cm (Fig. 25), mientras que con el mismo sistema y sin cobertura está varió de 1,31 g.cm⁻³ en la capa de 0-10 cm a 1,42 g.cm⁻³ en la capa 10-20cm . Estos valores tienen una relación con el contenido de arcilla, la porosidad y el contenido de materia orgánica presente en estos estratos. Según la FAO (2000), estos valores le proporcionan al suelo una buena disponibilidad de agua y alrededor de un 10% de espacio poroso.

Tabla 17. Densidad aparente (g.cm⁻³) en el perfil de suelos, fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	1,38	1,42	1,40	1,37	1,32	1,38 a	2,57
SPF-SC	1,40	1,41	1,43	1,42	1,33	1,40 a	2,74
SBF-CC	1,38	1,46	1,43	1,36	1,31	1,39 a	4,23
SBF-SC	1,31	1,42	1,37	1,36	1,36	1,36 a	2,69
Promedio	1,37 ab	1,43 b	1,41 b	1,38 ab	1,33 a	1,38	3,06
Desvest	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,78
CV%	2,81	1,69	1,99	2,06	1,47	1,09	25,61

En la misma tabla 17 se observa que no existen diferencias significativa entre las fincas con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar con o sin cobertura, pero si hay diferencias significativas en profundidad entre los estratos de 0 – 40 cm, que presentan los valores más altos respecto al último en relación directa con contenido de arena y limo en esos horizontes cuyo efecto se puede relacionar a lo expresado por Rubio (2010) atribuyéndole al cambio textural que presenta en el suelo, conforme aumenta su perfil. Además, estos valores tienen una relación con el contenido de arcilla presente, porosidad y contenido de materia orgánica presente en estos estratos, según la FAO (2000), valores que le proporciona una buena disponibilidad de agua y alrededor de un 10% de espacio poroso.

En todos los tratamientos el valor más alto de densidad aparente está en el estrato de 10-20 cm en fincas con sistemas de riego suprafoliar con cobertura y subfoliar con o sin cobertura vegetal con valor promedio de $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$, debido probablemente al mayor contenido de arcilla en este estrato. El coeficiente de variación es menor al 4,5%, por debajo del valor de 25% considerado como normal, en razón que son suelos aluviales sometidos a la misma formación y por lo tanto a una ligera incidencia de los riegos presurizados.

El rango de las densidades en esta finca hasta los 40 cm de profundidad está entre 1,37 y $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$ (Fig.25). Según Griffith et al. (1977), los valores críticos se sitúan entre 1,40 y $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$ para los suelos franco-arcillo-limoso. Estos valores son superiores a $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$, que según Venanzi et al., (2002), produce una reducción lineal del 50% en la biomasa radical del trigo.

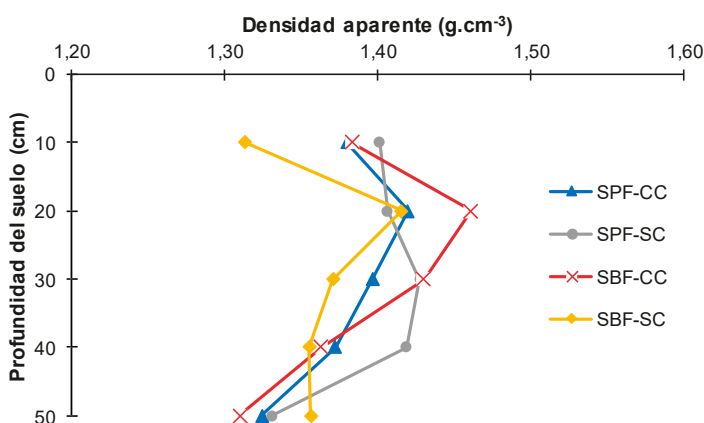


Figura 25. Densidad aparente (g.cm^{-3}) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad aparente del suelo (g.cm^{-3}) en los perfiles de suelos, en las fincas con riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Cobertura	0,00002	1	0,00002	0,02	0,8841
B:Profundidad	0,02262	4	0,00566	6,25	0,0049
C: Sistema de riego	0,00072	1	0,00072	0,80	0,3885
RESIDUOS	0,01176	13	0,00091		
TOTAL (CORREGIDO)	0,03512	19			

En tabla 18 se presentan los resultados del análisis de varianza de la densidad aparente, en la que se tomó en consideración tres factores: la cobertura, la profundidad y el sistema de riego. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que el valor P de la profundidad es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las diferencias de la densidad aparente, con un 95.0% de nivel de confianza.

4.3 Densidad real

En tabla 19, se presentan los resultados de las densidades reales de los suelos, con y sin cobertura vegetal. Los valores más altos se registraron en los suelos con cobertura, tanto en el sistema riego subfoliar como en el suprafoliar, y a una profundidad de capa de 10-20 cm y 20-30 cm, respectivamente. Estos valores son inferiores a $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$, lo que concuerda con lo señalado por Leenhur (1967) para estos suelos con un contenido de materia orgánica inferior al 1%. Aquellos suelos con mayor contenido en aluminosilicatos y sílice, esta densidad suele tener un valor promedio de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ (Fig. 26). Por otra parte, existen diferencias significativas de la densidad real en las fincas que tienen cobertura vegetal y sin cobertura vegetal bajo las mismas condiciones de riego, pero no existe diferencia significativa dentro del perfil del suelo. El mayor valor del coeficiente de variación de la densidad real en estos suelos fue de 6,27%, por lo que se consideran como homogéneos, debido probablemente a la composición de las partículas del suelo dentro del perfil. Además, la presencia de cobertura actúa como amortiguador de la energía de la gota de agua de riego, protegiendo la superficie del suelo frente a la disgregación, conservando su estructura, y evitando la eluviación de las partículas más finas.

Tabla 19. Densidad real (g.cm^{-3}) en los perfiles de suelo, en las fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	2,32	2,35	2,50	2,44	2,45	2,41 a	3,03
SPF-SC	2,19	2,36	2,21	2,32	2,35	2,29 b	3,55
SBF-CC	2,48	2,52	2,48	2,36	2,60	2,49 a	3,55
SBF-SC	2,23	2,32	2,36	2,25	2,25	2,28 b	2,37
Promedio	2,31 a	2,39 a	2,39 a	2,34 a	2,41 a	2,37	3,13
Desvest	0,13	0,09	0,13	0,08	0,15	0,10	0,56
CV%	5,65	3,82	5,55	3,42	6,27	4,28	17,86

En esta tabla 19 se aprecia que la mitad inferior del perfil considerado muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado una letra junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos, no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma letra.

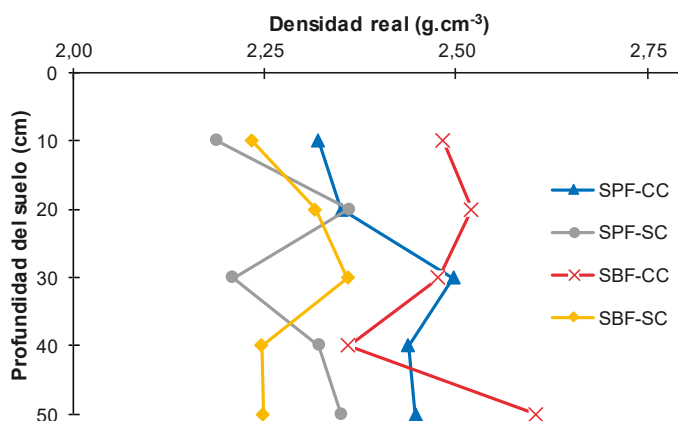


Figura 26. Densidad real (g.cm⁻³) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 20. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad real del suelo (g.cm⁻³) en los perfiles de suelos, fincas que tienen riegos presurizados, con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:cobertura	0,13778	1	0,137780	25,98	0,0002
B:profundidad	0,02942	4	0,007355	1,39	0,2922
C:riego	0,00648	1	0,006480	1,22	0,2890
RESIDUOS	0,06894	13	0,005303		
TOTAL (CORREGIDO)	0,24262	19			

El ANOVA, dado en tabla 20, descompone la variabilidad de densidad real en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que un valor-P en la variable cobertura, es menor que 0,05, este

factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la densidad real con un 95,0% de nivel de confianza.

4.4 Porosidad de los suelos

Los resultados de la porosidad (Tabla 21), determinan que no existen diferencias significativas en las diversas capas del perfil en los suelos, pero sí existe diferencia significativa entre las fincas que tienen cobertura vegetal respecto a las sin cobertura, independiente de los sistemas de riego. Se evidencia en el último estrato un mayor porcentaje de porosidad, excepto en el sistema de riego subfoliar sin cobertura en donde el mayor porcentaje se presenta en el estrato de 20- 30 cm, con 41,34 % (Fig. 27). Esta tendencia guarda estrecha relación con los porcentajes de limo, y además en los suelos con cobertura el kudzu tiene un sistema radicular grueso, de alrededor de 50 cm, que al cumplir su ciclo fisiológico y necrosarse ayuda a la formación de bioporos, aumentando la porosidad de estos suelos; sus porcentajes están dentro los parámetros analizados por la FAO (2010), que define valores del 35 al 50% en los suelos franco-arenosos y de un 40 a 60% en los arcillosos.

En la misma tabla 21, se observa que la mayor porosidad total se presenta en suelos con cobertura vegetal y sistemas de riego subfoliar. Esto puede deberse a que al caer las gotas de agua sobre la superficie del suelo con cubierta vegetal, estas llegan con menor energía cinética, ejercen un menor impacto sobre la estructura del suelo y por lo tanto se evita la rotura de los agregados. Los valores fluctúan de 41,39 – 48,48% en riego subfoliar a 39,56-45,36 % en el riego suprafoliar, lo que concuerda con los valores señalados por Archet y Smith (1972), cuyos valores fluctúan entre 35- 50%, para suelos franco-arenosos. Bajo estas condiciones, estos suelos proporcionan la máxima disponibilidad de agua y por lo menos un 10% de porcentaje de aireación, lo que permite un adecuado desarrollo radicular.

La variabilidad de los porcentajes de porosidad se puede considerar homogénea tanto en el perfil del suelo como entre los sistemas de riego en las fincas con o sin cobertura vegetal, con un valor máximo de coeficiente de variación de 8,59%, menor que el 25% considerado como normal. Además, concuerda con lo señalado por Ceddia et al (2009), en

cuyas investigaciones efectuadas en el perfil de suelo no observaron cambios de esta propiedad en los primeros 10 cm del suelo.

Tabla 21. Porosidad total (%) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	40,19	39,14	43,08	43,17	45,78	42,27 a	6,25
SPF-SC	35,44	40,29	35,10	38,63	42,93	38,48 b	8,59
SBF-CC	44,26	41,50	42,09	41,61	49,18	43,73 a	7,43
SBF-SC	40,40	38,73	41,34	39,37	39,54	39,88 b	2,54
Promedio	40,07 a	39,91 a	40,40 a	40,70 a	44,36 a	41,09	6,20
Desv.est.	3,61	1,24	3,61	2,08	4,10	2,35	2,62
CV%	9,01	3,12	8,92	5,10	9,25	5,73	42,29

Esta tabla 21, se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes entre sí. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado una letra junto a cada par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las columnas, aquellas fincas con o sin cobertura vegetal y los sistemas de riego subfoliar y suprafoliar, existiendo diferencias significativas respecto al tipo de cobertura.

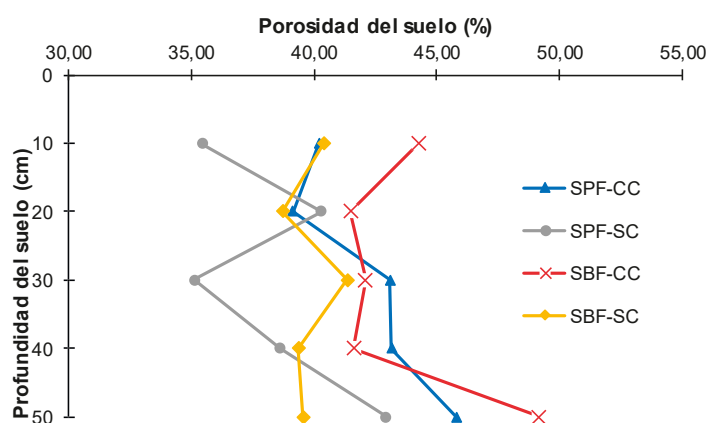


Figura 27. Porosidad total (%) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar con cobertura vegetal y sin cobertura vegetal.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo

del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) para la porosidad total del suelo (%) en los perfiles de suelos, en fincas que poseen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:cobertura	73,0766	1	73,0766	15,07	0,0019
B:profundidad	54,8846	4	13,7212	2,83	0,0687
C:riego	10,1816	1	10,1816	2,10	0,1710
RESIDUOS	63,0365	13	4,84896		
TOTAL (CORREGIDO)	201,179	19			

En la tabla 22, el ANOVA descompone la variabilidad de porosidad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se midió eliminando los efectos de los demás factores. En razón que el valor-P en cuanto a cobertura es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la porosidad con un 95.0% de nivel de confianza.

4.5. Porosidad de aireación (%)

En tabla 23 se evidencia la porosidad de aireación de los suelos que en los primeros estratos, sus contenidos son inferiores al 10% mínimo para el normal desarrollo del sistema radicular del cultivo. En el último estrato del sistema de riego suprafoliar sin cobertura y el subfoliar con cobertura tienen valores 12,05 y 16,26%, similares a los valores determinados por Imhoff et al., (2001), que determinaron porcentajes de aireación del 15 – 20% y permitieron alcanzar las máximas tasas de crecimiento de tallos y hojas para el cultivo de maíz, aunque otros autores con Reynolds et al (2009) hallaron satisfactorio un 15% como límite.

Tabla 23. Porosidad de aireación (%) en el perfil de suelo, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar, con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	0,00	2,19	7,33	8,78	8,61	5,38 a	74,85
SPF-SC	0,00	1,69	0,00	0,01	12,05	2,75 b	190,91
SBF-CC	9,07	7,15	8,50	10,66	16,26	10,33 a	34,34
SBF-SC	0,00	0,00	5,67	0,07	2,39	1,63 b	152,66
Promedio	2,27 a	2,76 a	5,38 a	4,88 a	9,83 a	5,02	113,19
Desv.est	4,54	3,07	3,77	5,64	5,86	3,87	71,38
CV%	200,00	111,50	70,08	115,60	59,66	77,11	63,06

Esta tabla 23, se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras en el perfil del suelo. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0% de confianza. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna, pero sí existe diferencia significativa entre las fincas que tienen cobertura vegetal, respecto a las sin cobertura (Fig.28). Nuevamente, el método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con el nivel de confianza empleado, hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 24. Análisis de varianza (ANOVA) para la porosidad de aireación (%) del suelo en los perfiles de suelos, fincas que tienen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:cobertura	160,574	1	160,5740	13,70	0,0027
B:profundidad	143,811	4	35,9528	3,07	0,0553
C:riego	18,2596	1	18,2596	1,56	0,2340
RESIDUOS	152,376	13	11,7212		
TOTAL (CORREGIDO)	475,021	19			

La tabla 24, el ANOVA descompone la variabilidad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que en el factor cobertura, el valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre cobertura con un 95,0% de nivel de confianza.

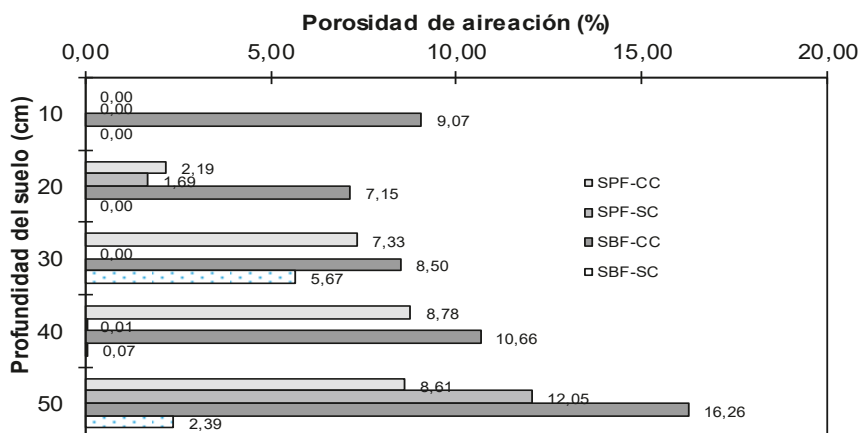


Figura 28. Porcentaje de porosidad de aireación (%) de los suelos, fincas con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar en las áreas de ensayo.

4.6 Superficie Específica (SE), BET- N₂ en los perfiles de los suelos de las fincas con sistemas de riego presurizado

La superficie específica definida como el área superficial del sólido por unidad de masa $m^2 \cdot g^{-1}$, influye en gran medida sobre diversas propiedades físicas y químicas que presentan los suelos. La habilidad del suelo para acumular y preservar la materia orgánica ha sido objeto de especial interés en las últimas décadas, por la posibilidad de controlar la creciente concentración del CO₂ en la atmósfera. Por otro lado, otros estudios han mostrado que la remoción de la materia orgánica de las partículas del suelo y la variación de la SE evaluada, estaría negativamente correlacionadas. De lo señalado permite además de analizar los contenidos de la SE en las fincas con o sin cobertura y sistemas de riego diversos, también efectuar varias correlaciones.

Tabla 25. Superficie específica ($m^2 \cdot g^{-1}$) en el perfil de suelos, fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	6,61	6,79	6,20	7,41	9,80	7,36 a	19,43
SPF-SC	6,07	6,91	5,62	5,76	6,34	6,14 a	8,35
SBF-CC	6,84	6,46	6,10	7,47	7,93	6,96 a	10,65
SBF-SC	6,94	8,11	8,91	7,14	7,78	7,78 a	10,15
Promedio	6,62 a	7,07 a	6,71 a	6,95 a	7,96 a	7,06	12,15
Desv.est	0,39	0,72	1,49	0,80	1,42	0,70	4,96
CV%	5,87	10,21	22,19	11,57	17,84	9,88	40,80

Esta tabla 25, aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. Se ha identificado un grupo homogéneo; el método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Los mayores valores de superficie específica se da en los suelos con sistema de riego suprafoliar con cobertura y subfoliar sin cobertura, con valores de 7,36 y 7,78 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ (Tabla 27) valores que depende por el tipo de arcilla presente y en menor grado por el contenido de materia orgánica. La variabilidad vertical de dichos contenidos, debido a la dinámica del agua, a irregularidades en la distribución radicular, a los cambios topográficos y a las diferentes propiedades físicas-químicas del suelo en los distintos sectores, además del grado de compactación del mismo (Fig. 29).

Tabla 26. Análisis de varianza (ANOVA) de la superficie específica ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) en los perfiles de suelos, en fincas que poseen riegos presurizados, con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Cobertura	0,20605	1	0,20605	0,53	0,5054
B:Profundidad	4,60027	4	1,15007	2,98	0,1576
C:Riego	1,90344	1	1,90344	4,93	0,0905
INTERACCIONES					
AB	6,10693	4	1,52673	3,96	0,1057
AC	5,19181	1	5,19181	13,45	0,0214
BC	1,69693	4	0,42423	1,10	0,4645
RESIDUOS	1,54347	4	0,38586		
TOTAL (CORREGIDO)	21,2489	19			

La tabla 26, muestra los datos del ANOVA, en la que descompone la variabilidad de la fuente de variación en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que un valor-P, es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre variable con un 95.0% de nivel de confianza, resultando una interacción de la cobertura con el sistema de riego.

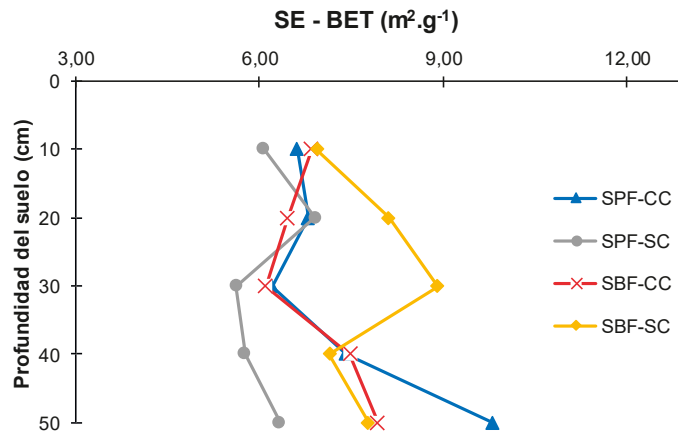


Figura 29. Dinámica de la SE en el perfil del suelo en fincas con riego presurizado y cobertura vegetal.

Al correlacionar los valores de la superficie específica, con los contenidos de humedad del suelos en su punto de marchitez permanente, se determinó un valor de $R^2 = 0,2012$ debido a las condiciones de humedad del suelo lo que demuestra una baja correlación entre SE y el contenido de humedad en ese punto (Fig. 30 a).

En cambio, cuando se correlaciono la SE con los contenidos de humedad a potenciales hídricos bajos (0,3 y 0,1 bar) de la curva de retención de humedad, el coeficiente de bondad del ajuste $R^2 = 0,8678$, $R^2 = 0,9404$, respectivamente, existiendo una tendencia significativa para esos potenciales hídricos. (Fig. 30b, 30c) lo que demuestra una estrecha relación con esta propiedad, como lo determinó Petersen et al. (1996), debido probablemente al tipo de arcilla presente en estos suelos.

Al correlacionar la SE y la retención de humedad, se encontró una correlación significativa positiva, debido probablemente, a que la absorción de nitrógeno y la retención del agua son fenómenos físicos relacionados con la superficie del sólido y el contenido de arcilla, aunque en el caso de la retención del agua el fenómeno de capilaridad debe ser considerado.

Tabla 27.Contenidos de humedad (%) a diferentes tensiones de la curva de retención versus la superficie específica (BET - $m^2 \cdot g^{-1}$).

RIEGO PRESURIZADO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)				SUPERFICIE ESPECÍFICA ($m^2 \cdot g^{-1}$)
	0,1 BAR	0,33 BAR	15 BAR	PI	
SPF-CC	49,200	47,750	31,461	25,330	6,753
SPF-SC	50,380	48,230	27,347	24,160	6,092
SBF-CC	48,050	48,050	25,395	26,190	6,719
SBF-SC	45,400	44,180	30,194	23,000	7,777

PI: contenido de humedad en el punto de inflexión de la curva de retención

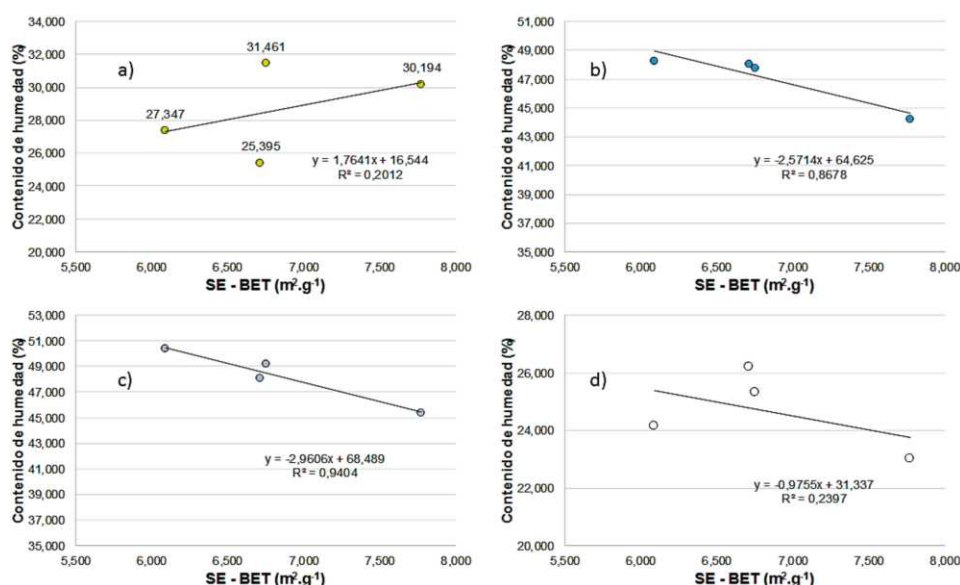


Figura 30.Correlaciones de la superficie específica con los contenidos de humedad a diferentes tensiones: a) 15 bar, b) 0.33 bar, c) 0.1 bar y d) y en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad.

Al correlacionar los valores de la superficie específica (Tabla 27), con los contenidos de humedad del suelos en su punto de inflexión, se determinó una baja correlación de $R^2 = 0,2397$ debido posiblemente a las condiciones de humedad del suelo lo que determina una baja correlación entre SE y el contenido de humedad en ese punto (Fig. 30 d).

En figura 31, al correlacionar la superficie específica con el contenido de arcilla, se valor de $R^2 = 0,0026$ (Fig. 31), nula correlación, contrario a lo obtenido por Gromann (1972), que encontró una correlación positiva del contenido de arcilla en suelos oxisoles. Tampoco hubo correlación de la SE con la materia orgánica y el limo más arcilla. La materia orgánica tiene una SE del orden de $1 m^2 \cdot g^{-1}$, cuando se le estima con absorción del N_2 . Sin embargo, puede a llegar a modificar la superficie del sólido, taponando los poros y

evitando que el N₂ penetre al interior del mismo, lo cual resulta en una débil o nula correlación, sugiriéndose eliminar primero la materia orgánica con H₂O₂ (Fig. 32; 33).

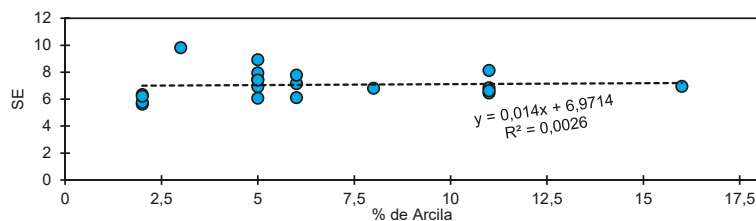


Figura 31. Análisis de regresión de la superficie específica con el contenido de arcilla.

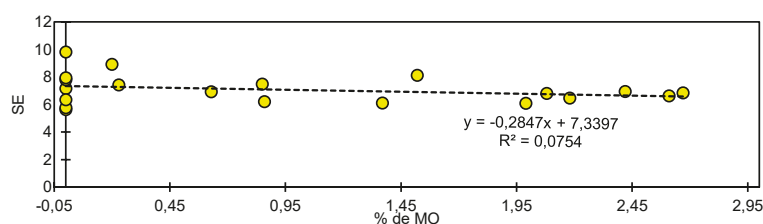


Figura 32. Análisis de regresión de la superficie específica con el porcentaje de materia orgánica.

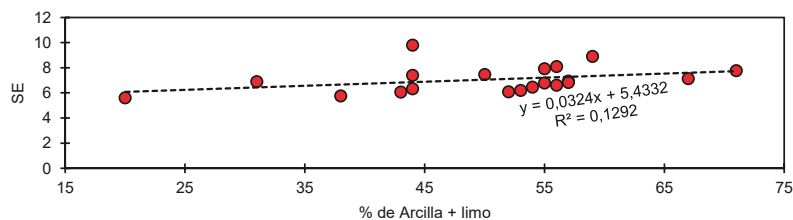


Figura 33. Regresión de la superficie específica con los contenidos de arcilla más limo.

4.7 Contenidos de humedad

La variabilidad vertical y horizontal de los contenidos humedad puede deberse a la dinámica del agua, a irregularidades en la distribución radicular, a los cambios topográficos y a las diferentes propiedades físicas-químicas del suelo en los distintos sectores, además del grado de compactación del mismo.

En tabla 28 se observa que no existe diferencia significativa en el contenido de humedad en el perfil del suelo, por lo que señalamos que la cobertura vegetal ejerce como amortiguador de la energía de la gota de agua y luego por un proceso de infiltración se distribuye por igual en el perfil. El potencial matricial debido a las fuerzas de atracción ejercida por las superficies sólidas del suelo y la atracción molecular entre las propias

moléculas del agua sea casi igual en el perfil, sin embargo, se nota que el mayor contenido de humedad se presenta en el estrato de 0 – 10cm, para disminuir hasta la capa de 20 – 40 cm, sector donde se encuentra la mayor masa radicular del cultivo de banano (Fig.34).

La capacidad de absorción del agua en el suelo, tal como señalan Jury et al. (1991), está en función del tipo de arcilla presente en los dos primeros estratos que tienen los mayores porcentajes, además el contenido de arcilla presente, dado que la montmorillonita tiene mayor capacidad de absorción que la illita y esta a su vez mayor que la caolinita.

También es importante resaltar que el contenido de materia orgánica y la composición textural de estas capas, y el arreglo que presenta el medio físico-edáfico por el aporte de agua natural (lluvia) o artificial (riego), permite que no exista diferencia significativa en los sistemas de riego suprafoliar y subfoliar en fincas con o sin cobertura, señalando de que el menor contenido de humedad en el sistema subfoliar con cobertura se debe a que un buen porcentaje de agua o lluvia del aspensor es interceptado por el área foliar de la cobertura vegetal, mientras que los valores más altos se producen en el sistema de riego subfoliar sin cobertura donde las intensidades pluviométricas son bajas. Estas bajas intensidades permiten que el agua se infiltre en las diversas capas del perfil del suelo, además de reducirse las pérdidas de agua por evaporación o por influencia del viento con este sistema de riego.

Tabla 28. Porcentaje de humedad en el perfil de suelos (%), fincas que poseen sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	28,57	25,21	24,27	24,50	27,49	26,01 a	7,37
SPF-SC	26,13	25,91	24,02	25,70	21,67	24,68 a	7,62
SBF-CC	24,56	22,69	23,30	22,14	23,96	23,33 a	4,14
SBF-SC	34,17	26,35	24,47	27,55	26,08	27,72 a	13,59
Promedio	28,36 a	25,04 a	24,01 a	24,97 a	24,80 a	25,44	8,18
Desv. Est.	4,21	1,63	0,51	2,27	2,54	1,88	3,94
CV%	14,86	6,53	2,13	9,08	10,25	7,38	48,16

En la misma

Esta tabla 23, se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras en el perfil del suelo. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0% de confianza. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos

niveles que compartan una misma columna, pero sí existe diferencia significativa entre las fincas que tienen cobertura vegetal, respecto a las sin cobertura (Fig.28). Nuevamente, el método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con el nivel de confianza empleado, hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.28 se observa el descenso del contenido de humedad de 28,57 a 24,27% en un sistema suprafoliar con cobertura en el estrato de 20 -30 cm, y de 24,56 a 22,14% hasta la capa de 30-40 cm en el sistema subfoliar con cobertura. Esto puede deberse a que la mayor área radicular del cultivo de esta musácea se encuentra en esta profundidad, debido a las condiciones de porosidad de esas capas, por la ruptura del suelo provocado por las raíces del kudzu y al sistemático necrosamiento de ciertas raíces, lo que conlleva a una mayor masa radicular del cultivo y por ende a un aprovechamiento del agua.

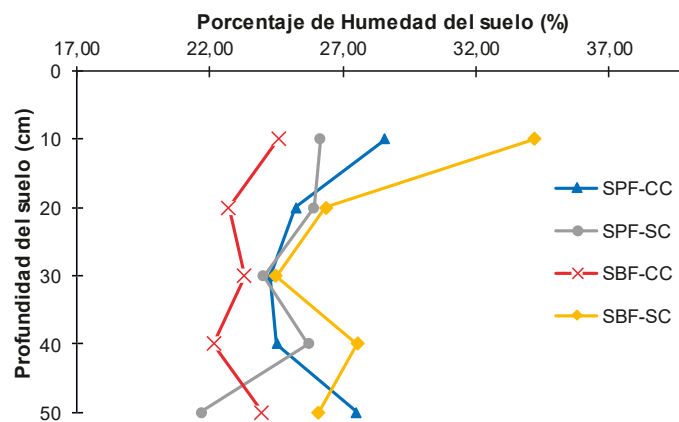


Figura 34. Porcentaje de humedad del suelo en el perfil de suelos (%), fincas con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con sin cobertura vegetal.

En la tabla 29, el ANOVA descompone la variabilidad de humedad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre humedad con un 95,0% de nivel de confianza. Sin embargo, interaccionan el tipo de cobertura y riego por tener un valor de P menor de 0,05, debido al efecto amortiguador de la energía de las gotas de agua, que no provoca escurrimiento y su infiltración del agua se produce en forma adecuada.

Tabla 29. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de humedad del suelo del suelo en los perfiles de suelos, fincas que poseen riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variacion	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Cobertura	11,7965	1	11,7965	2,57	0,1840
B:Profundidad	45,3222	4	11,3305	2,47	0,2012
C:Riego	0,1620	1	0,1620	0,04	0,8601
INTERACCIONES					
AB	20,3653	4	5,0913	1,11	0,4609
AC	40,8408	1	40,8408	8,9	0,0406
BC	5,3061	4	1,3265	0,29	0,8716
RESIDUOS	18,3462	4	4,5866		
TOTAL (CORREGIDO)	142,1390	19			

4.8 Contenidos de humedad obtenidos por la sonda de reflectometría de dominios de frecuencia (FDR)

4.8.1 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca el Cisne

En tabla 30, los contenidos de humedad se presentan más altos en los primeros 20 cm y luego disminuyen en los 20-40 cm, zona de mayor área radicular y por lo tanto hay mayor absorción de agua por el cultivo de banano, luego tener un ligero ascenso, que puede ser por el aporte de agua por capilaridad por haber una capa freática alta a pesar de la existencia de sistemas de drenaje, como verse en figura 35. El pozo de observación 4, presenta los menores contenidos de humedad en todo su perfil, en razón de esta ubicado en una zona de la finca en que su suelo es de textura arenosa.

Tabla 30. Promedio de los contenidos de humedad (%), medido la sonda FDR en las 24 semanas de estudio, finca El Cisne.

Contenidos de humedad Finca "El Cisne"							
TUBOS DE OBSERVACION	Profundidad de suelo (cm)						
	10	20	30	40	50	60	70
1	24,449	23,882	22,049	21,507	18,741	18,918	19,199
2	21,224	24,566	21,408	17,217	18,133	18,561	20,612
3	20,864	21,474	18,848	18,129	19,889	19,589	20,821
4	12,517	8,741	7,793	8,367	6,054	7,687	8,968
5	21,366	21,655	20,019	16,761	15,486	16,504	17,229
6	18,381	18,750	17,312	16,191	15,760	17,164	18,088
7	13,207	10,843	15,337	16,586	16,956	18,709	19,152
8	21,736	17,626	17,278	22,408	22,419	21,559	22,023
9	18,346	17,260	16,633	19,674	19,811	20,193	20,522
10	19,058	18,109	17,121	17,807	18,531	18,306	18,942
Suma	191,148	182,905	173,799	174,646	171,779	177,191	185,556
Promedio	19,115	18,291	17,380	17,465	17,178	17,719	18,556
Dev. est	3,763	5,169	3,998	3,829	4,417	3,804	3,652
CV%	19,688	28,263	23,005	21,924	25,714	21,471	19,684

El coeficiente de variación del contenido de humedad es heterogéneo en el perfil del suelo, con valores superior a 20%, debido a su composición textural. En figura 36, se observa la dinámica de la humedad del suelo en un periodo antes de la estación lluviosa las últimas semanas de enero hasta semanas posteriores de la estación, mediados de junio donde su contenido tiende a un valor lineal o casi constante, dependiendo la humedad del suelo del agua que aporta los sistemas de riego existentes. El contenido de humedad en la estación lluviosa presenta un coeficiente de variación alrededor del 5% en razón de los milímetros de agua, que recibía el suelo producto de las precipitaciones eran casi constante.

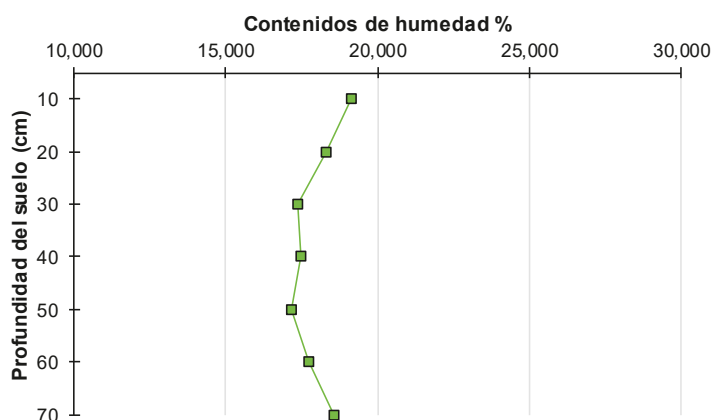


Figura 35. Comportamiento del contenido de humedad (%), en un perfil de suelo de 70 cm. Finca El Cisne.

Tabla 31. Comportamiento del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca El Cisne.

Profundidad (cm)	Semana calendario								
	5	6	7	9	11	13	15	17	24
10	18,468	18,37686	18,45	18,404	18,9935	19,583	20,946	19,509	19,303
20	17,42649	17,57366	18,373	17,87	18,3555	18,841	18,96	18,73	18,485
30	16,4366	16,48386	17,554	17,215	17,5455	17,876	18,073	17,492	17,743
40	16,81914	16,56731	17,625	17,427	17,601	17,775	18,211	17,617	17,539
50	16,2464	16,15943	17,093	16,669	17,2385	17,808	17,948	17,553	17,886
60	16,8842	17,03063	17,065	17,644	17,849	18,054	18,621	17,855	18,469
70	17,63126	17,6084	18,015	18,466	18,828	19,19	19,352	18,746	19,164
Suma	119,912	119,800	124,175	123,695	126,411	129,127	132,111	127,502	128,589
Promedio	17,130	17,114	17,739	17,671	18,059	18,447	18,873	18,215	18,370
Desv. est	0,769	0,782	0,563	0,643	0,676	0,746	1,043	0,782	0,688
CV%	4,489	4,566	3,174	3,639	3,744	4,044	5,528	4,294	3,746

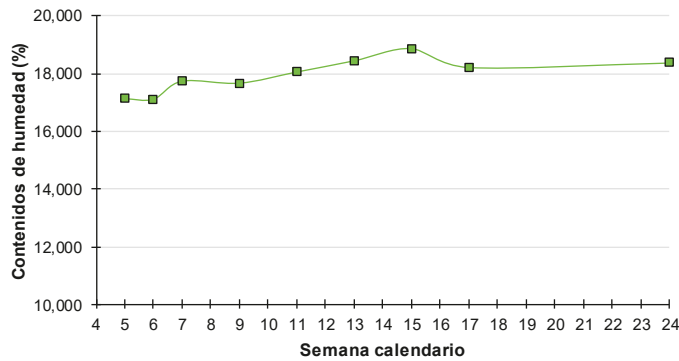


Figura 36.Comportamiento de la humedad del suelo (%), en las 24 semanas de lectura. Finca El Cisne

En la figura 37 se muestra los contenidos de humedad de toda la finca donde la mayor superficie mantiene en promedio contenidos de humedad entre el 14 y 18% y en tabla 31, está la dinámica de los contenidos de humedad a lo largo de toda la estación lluviosa desde Enero hasta Junio y muestra un ascenso a medida que se regularizan las lluvias.

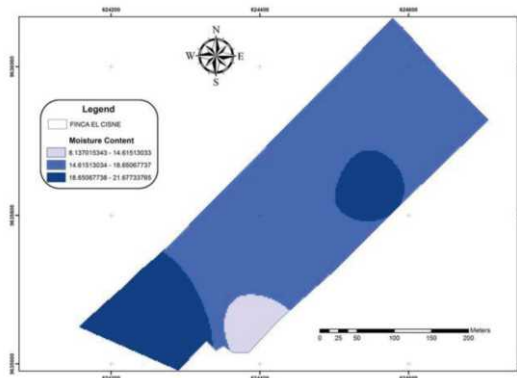


Figura 37.Comportamiento de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR en los suelos de la hacienda El Cisne.

4.8.2 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca La Fátima

En tabla 32, la dinámica del contenido de humedad en esta finca determina en promedio de 18,45% en el primer estrato de 10cm descendiendo hasta el estrato de 30 cm y a partir de este asciende hasta los 70 cm del perfil analizado (Fig. 38), estos valores más bajos en los estrato de 10 a 30 cm, se debe probablemente, que en esa profundidad esta la zona de más área radicular y por lo tanto de mayor absorción de agua por el cultivo.

Tabla 32 .Promedio de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca La Fátima.

Contenidos de humedad Finca "La Fátima"							
TUBOS DE OBSERVACION	Profundidad de suelo (cm)						
	10	20	30	40	50	60	70
1	19,926	20,851	20,125	18,186	18,011	18,054	19,193
2	13,560	12,054	11,678	12,300	13,687	13,778	14,387
3	20,277	17,175	17,114	16,806	17,213	16,703	16,394
4	13,638	7,229	5,845	14,517	19,342	18,142	17,408
5	21,843	19,891	21,901	22,594	22,821	22,663	23,845
6	20,731	17,922	18,153	21,157	22,017	21,998	21,846
7	20,032	20,127	20,761	21,096	21,102	20,727	20,842
8	20,308	16,586	12,304	12,688	14,359	15,810	17,961
9	15,690	12,989	12,086	13,376	14,682	15,234	16,002
10	18,469	20,502	23,892	23,555	23,700	23,431	25,388
Suma	184,474	165,327	163,859	176,274	186,933	186,541	193,265
Promedio	18,447	16,533	16,386	17,627	18,693	18,654	19,327
Desv. est	3,034	4,474	5,695	4,292	3,681	3,372	3,581
CV%	16,449	27,059	34,758	24,351	19,693	18,079	18,529

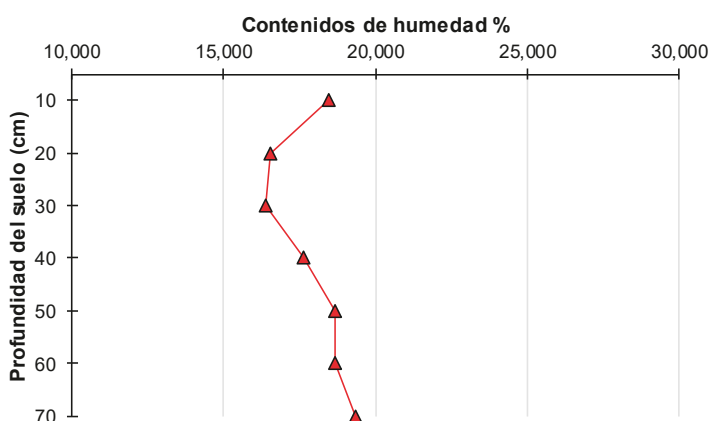


Figura 38. Comportamiento del contenido de humedad (%), en un perfil de suelo de 70 cm. Finca La Fátima

En tabla 33 se registran los contenidos de humedad desde la semana 5 hasta la 24 según calendario, en la puede observarse sus mayores contenidos de humedad entre la semana 9 hasta la 17, periodo donde se produjeron las mayores precipitaciones de la estación invernal. Por otra parte, se visualiza la dinámica del contenido de humedad antes, durante y después de la estación invernal y posterior a estas semanas, y su humedad casi constante durante el inicio del periodo de riego (Fig. 39). Así mismo en la figura 40 se observa que más del 50% de la superficie de la finca tiene un contenido de humedad promedio de 14 a 18%, característicos esos suelos de textura franco arenoso. La variabilidad de la humedad es casi homogénea manteniéndose por debajo del 25%, esto debido a la presencia de lluvias casi constante durante la estación lluviosa.

Tabla 33 .Comportamiento de la humedad (%), medido con la sonda FDR, en las 24 semanas de estudio, finca La Fátima.

Profundidad (cm)	Semana calendario								
	5	6	7	9	11	13	15	17	24
10	17,937	17,703	17,384	18,061	19,066	20,071	19,511	18,180	18,114
20	15,963	15,935	15,840	16,222	16,680	17,137	17,827	16,732	16,459
30	15,785	15,590	15,629	16,121	16,421	16,720	17,028	16,961	17,219
40	17,245	17,213	17,076	17,355	17,744	18,133	18,218	17,876	17,787
50	18,593	18,392	18,467	17,355	18,454	19,553	19,902	18,889	18,635
60	18,143	18,376	17,974	17,934	18,958	19,981	19,529	19,194	17,798
70	19,430	18,983	18,594	19,239	19,792	20,344	19,723	19,411	18,423
Suma	123,096	122,192	120,964	122,287	127,113	131,939	131,738	127,243	124,435
Promedio	17,585	17,456	17,281	17,470	18,159	18,848	18,820	18,178	17,776
Desv. est	1,344	1,289	1,188	1,088	1,265	1,499	1,120	1,058	0,743
CV%	7,644	7,384	6,875	6,226	6,964	7,953	5,951	5,823	4,182

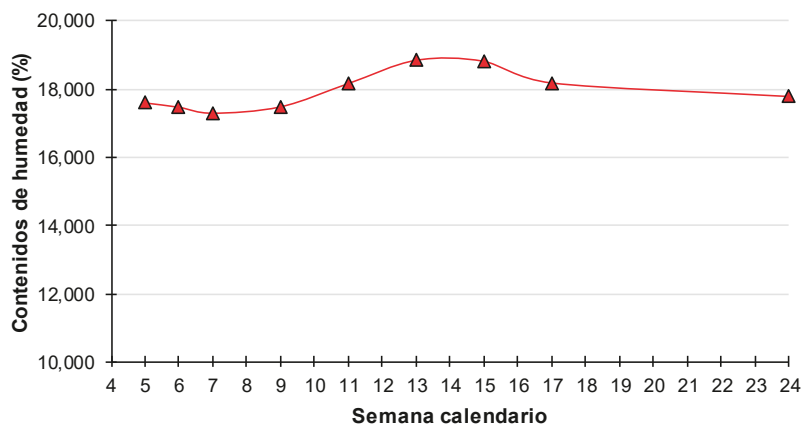


Figura 39. Comportamiento del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR, en las 24 semanas. Finca La Fátima.

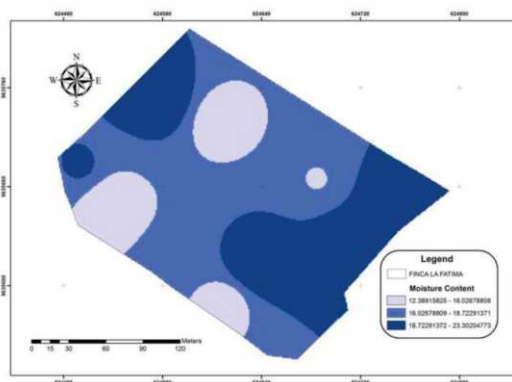


Figura 40. Comportamiento de los contenidos de humedad en un perfil de suelo de 70 cm, medido con la sonda FDR, Finca La Fátima.

4.8.3 Contenidos promedios de humedad de los suelos en un perfil de 70 cm, determinados con la sonda FDR. Finca El Carmen

En la tabla 34 y la figura 41 se observa que los menores contenidos de humedad se registran 30 a 40 cm, lugar donde está la mayor masa radicular del cultivo y como consecuencia de la alta evapotranspiración, lo que ocasiona mayor absorción del agua del suelo. En tabla 35, figura 42, muestra el comportamiento de la humedad durante el periodo de observación, en la que se evidencia los mayores contenidos de humedad en las semanas del 13 al 17, para a partir de esta se mantiene casi constante hasta semana 24, en la que el periodo de riego comienza en la zona. La mayor superficie de la finca (Fig.43) posee un contenido de humedad entre 14 y 18% y la tendencia en el tiempo del contenido de humedad fue siempre al alza durante la estación lluviosa desde un valor de 14,65% al inicio de la estación hasta un 19,53% a finales de la época.

En todos los casos la interpretación de las gráficas establece el estatus óptimo de humedad del suelo, para lograr la máxima dinámica del agua y definir la frecuencia de riego. Así mismo permite definir una zona de estrés hídrico por exceso o falta de agua en el suelo a través de los pozos de observación. Por otro lado, las gráficas de los contenidos de humedad a diversas profundidades permiten establecer el tiempo de riego, evitando pérdidas por percolación bajo la zona activa de las raíces tanto de nutrientes, como de partículas finas que puedan eluviarse. En definitiva, controlando la humedad del suelo sabiendo cuando y cuanto regar, se previene la formación de encostramiento o sellado de los suelos que están en riesgos de degradación.

Tabla 34. Promedio general del contenido de humedad (%), medido con sonda FDR en las 24 semanas de observación, finca El Carmen.

Contenidos de humedad Finca "El Carmen"							
TUBOS DE OBSERVACION	Profundidad de suelo (cm)						
	10	20	30	40	50	60	70
1	23,396	18,356	15,122	13,630	14,593	18,186	19,172
2	22,944	19,279	15,099	12,003	14,673	14,592	15,209
3	23,173	19,159	14,220	9,832	12,369	15,458	15,532
4	24,028	20,522	13,867	13,662	16,299	16,291	17,367
5	22,042	20,209	16,330	15,432	17,398	15,790	16,800
6	19,307	18,371	16,315	17,632	17,636	16,848	16,899
7	21,790	19,744	15,126	17,539	19,351	20,672	21,251
8	16,724	19,938	13,753	11,586	12,719	14,559	15,628
9	13,957	18,989	15,542	10,801	11,231	14,248	15,178
10	22,174	19,691	14,446	18,234	19,026	19,317	19,272
Suma	209,535	194,257	149,821	140,351	155,295	165,961	172,307
Promedio	20,954	19,426	14,982	14,035	15,530	16,596	17,231
Desv.est	3,287	0,730	0,918	3,044	2,854	2,169	2,059
CV%	15,687	3,756	6,127	21,685	18,380	13,067	11,951

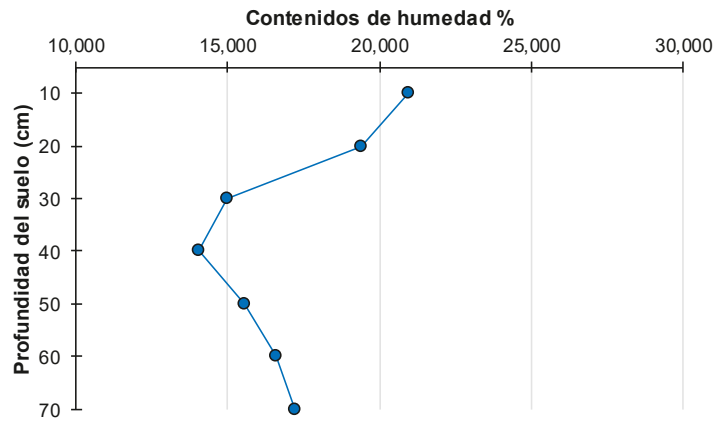


Figura 41. Comportamiento de la humedad (%), en un perfil de 70 cm de suelo.

Tabla 35. Comportamiento de la humedad (%), en las 24 semanas de estudio, finca El Carmen.

Profundidad (cm)	Semana calendario								
	5	6	7	9	11	13	15	17	24
10	20,09	20,004	20,353	20,711	21,3045	21,898	22,515	20,595	21,111
20	17,779	17,443	18,742	19,384	19,777	20,17	21,152	19,778	20,606
30	13,059	13,013	13,625	14,81889	15,4055	16,006	16,539	16,052	16,377
40	11,306	11,146	12,413	13,211	13,6095	14,008	17,05	16,923	16,649
50	12,839	12,732	13,057	14,869	15,3555	15,842	18,815	17,922	18,334
60	13,143	14,376	14,695	14,977	16,6095	18,242	19,974	18,714	18,634
70	14,334	15,174	15,45	15,679	17,406	19,133	20,63	18,662	18,608
Suma	102,550	103,888	108,335	113,650	119,468	125,299	136,675	128,646	130,319
Promedio	14,650	14,841	15,476	16,236	17,067	17,900	19,525	18,378	18,617
Desvest	3,129	3,033	2,992	2,734	2,685	2,761	2,182	1,571	1,786
CV%	21,359	20,437	19,334	16,841	15,735	15,426	11,173	8,547	9,596

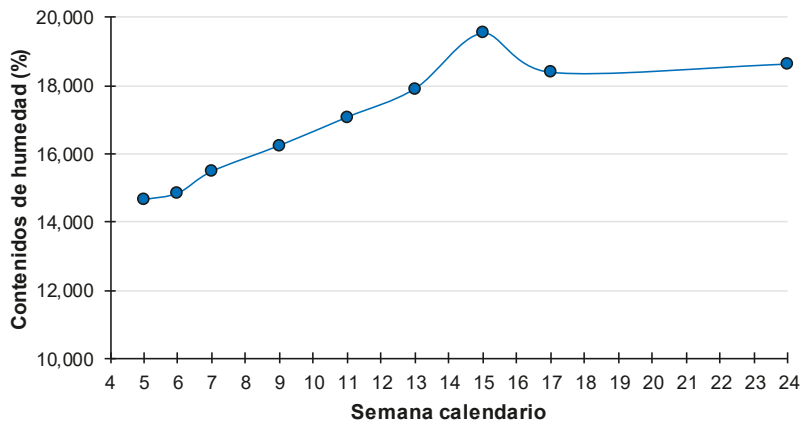


Figura 42. Comportamiento de la humedad (%), medido.

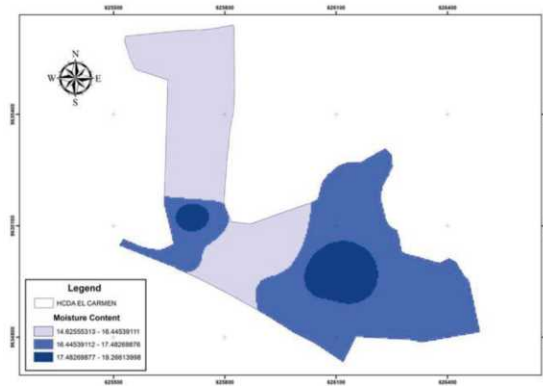


Figura 43.Comportamiento de los contenidos de humedad (%), medido con la sonda FDR en los suelos de la Finca El Carmen.

4.8.4 Contenidos de humedad medida (%), medido a través de la sonda FDR en un perfil de suelo de 70 cm, fincas con sistema de riego presurizados

Tabla 36.Contenidos de humedad en el perfil de suelos de las fincas (%), con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con o sin cobertura vegetal.

Fincas	Profundidad de suelo (cm)							suma	promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70			
La Fátima	18,447	16,533	16,386	17,627	18,693	18,654	19,327	125,667	17,952 a	6,330
El Cisne	19,115	18,291	17,380	17,465	17,178	17,719	18,556	125,702	17,957 a	3,970
El Carmen	20,954	19,426	14,982	14,035	15,530	16,596	17,231	118,753	16,965 a	14,588
Promedio	19,505 a	18,083 a	16,249 a	16,376 a	17,134 a	17,656 a	18,371 a	123,374	17,625	8,296
Desv.Est	1,298	1,458	1,205	2,029	1,582	1,030	1,060	4,002	0,572	5,575
CV%	6,654	8,061	7,414	12,388	9,236	5,836	5,770	3,244	3,244	67,204

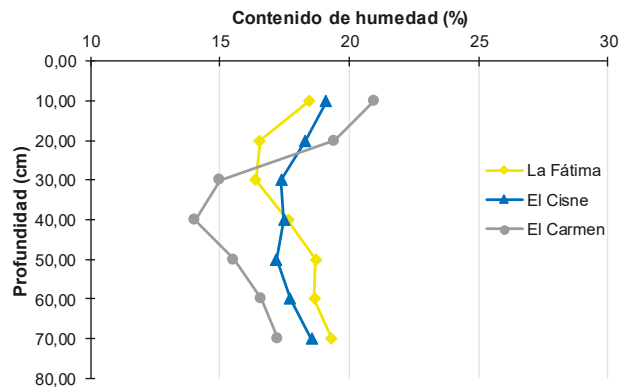


Figura 44.Contenido de humedad (%) en el perfil de suelos con sistemas de riego de las tres fincas estudiada.

Los coeficientes de variación de la tabla 36, figura 44, el coeficiente de variabilidad de estos contenidos es inferior al 25%, considerado como normales, esta variabilidad entre los factores repercuten entre los sistemas de riego presurizados, dado que por medio del análisis de varianza de Tukey no existe significancia entre los grupos establecidos y que estadísticamente son iguales.

En figura 45 se evidencia el menor contenido de humedad promedio a lo largo del perfil, está en el estrato de 30 – 50 cm, zona de mayor absorción de agua para los procesos fisiológicos de las plantas.

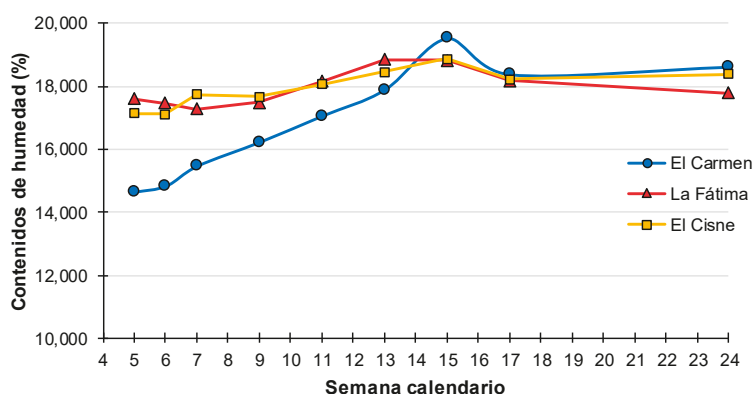


Figura 45. Comportamiento de la curva de humedad (%), durante las 24 semanas de estudio, en fincas de investigación.

Tabla 37. Análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de humedad en los perfiles de suelos, bajo sistemas de riegos presurizados.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:fincas	4,57684	2	2,28842	1,17	0,3446
B:Profundidad	23,9925	6	3,99875	2,04	0,1385
RESIDUOS	23,5528	12	1,96273		
TOTAL (CORREGIDO)	52,1221	20			

En la tabla 37, el ANOVA descompone la variabilidad del porcentaje de humedad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que no existe un valor-P es menor que 0,05, ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la humedad, con un 95.0% de nivel de confianza.

4.9 Curvas de retención de humedad

Se conoce que sobre el agua del suelo actúan fuerzas muy variables y de diversa intensidad y dirección, creando diferencias de energía potencial entre varios puntos; conocer las curvas de retención de humedad a distintos potenciales permite la regulación y optimización del agua para riego y representa la evolución del contenido volumétrico en función de la succión. Refleja la capacidad del suelo para retener agua.

En la finca El Cisne con cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar, la curva de retención de humedad tiene como ecuación polinomial $Y = -0,0001x^3 + 0,0076x^2 - 0,2275x + 6,9997$ (figura 46a) ; la segunda derivada de la ecuación permite determinar el punto de inflexión, con contenido de humedad del 25,33%, que es el límite entre la zona saturada y la zona de saturación residual. Alrededor de este contenido por encima de este punto se encuentra el agua aprovechable para las plantas. Además, este valor nos permite identificar la tensión matricial a la que el agua está retenida en el suelo sin poder ser absorbida por las plantas, que es caso es de $pF = 4,49$. La tendencia de esta curva es característica de un suelo con tendencia a la compactación.

En figura 46b se observa el comportamiento de la curva de retención de humedad de la finca El Cisne con cobertura vegetal y riego suprafoliar, cuya ecuación es $y = -0,0002x^3 + 0,0145x^2 - 0,3597x + 7,0001$, y donde el punto de inflexión de la curva es igual a 24.17% de contenido de humedad. La pendiente de la tangente a la curva en ese punto es próxima a cero, por lo que la tensión de succión se mantiene en un valor casi constante, dentro de un intervalo de humedad que va desde el 15 al 35%. El punto de inflexión define el límite entre la zona saturada y zona de saturación residual, en definitiva, el valor límite inferior de humedad donde el sistema radicular se desarrolla normalmente. La tensión matricial para ese contenido de humedad es de un $pF = 3,95$.

La ecuación ajustada para la finca La Fátima con riego subfoliar sin cobertura vegetal (Fig. 46c) fue $y = -7E - 05x^3 + 0,0055x^2 - 0,2042x + 6,9994$, y el punto de inflexión de la curva que a su vez determina el límite del contenido de humedad óptimo, es de 26,19%. Este contenido de humedad divide a la zona de saturación, donde los poros están llenos de agua y la zona de saturación residual, donde el agua se mantiene inmóvil, por lo tanto entorno a este punto de inflexión señalado está la zona de desaturación el agua es

desalojada por aire y la que se encuentra dentro los poros se torna inmóvil y fácilmente aprovechable para la mayor de los cultivos. Este límite determina un valor de tensión matricial $pF = 4,16$. La tendencia de curva a la linearización es típica de un suelo de textura fina, propenso a la compactación.

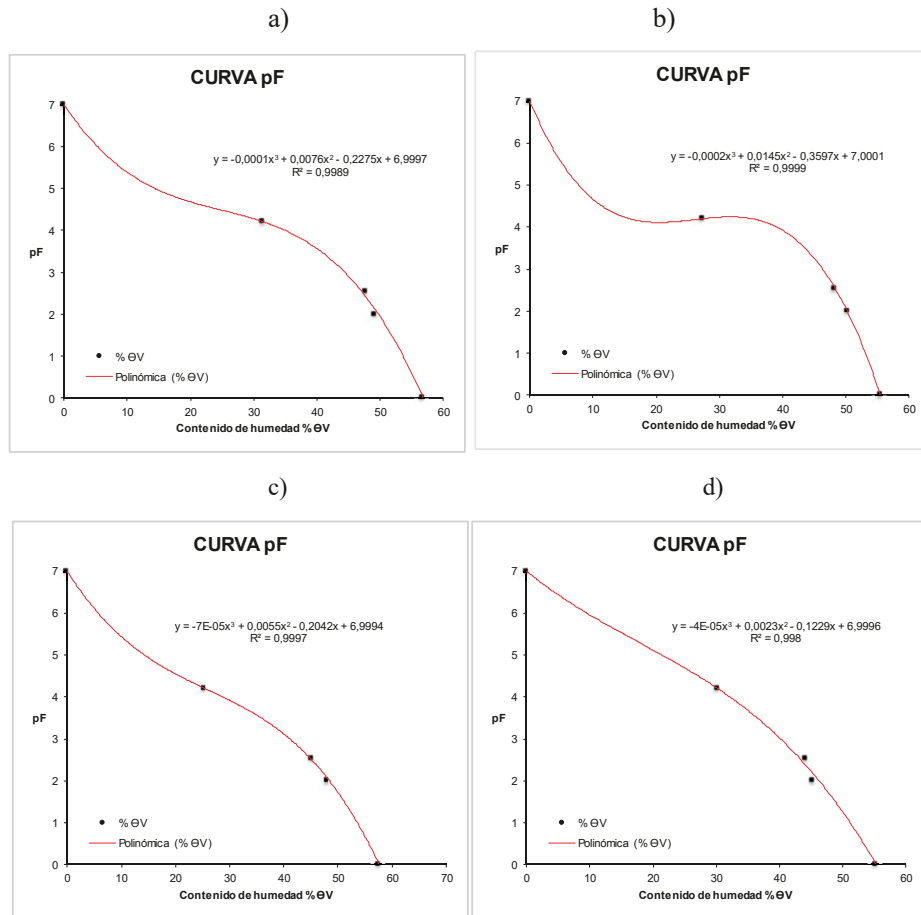


Figura 46. Curvas de retención de humedad de las fincas; a) Finca El Cisne riego subfoliar con cobertura, b) Finca El Cisne con riego suprafoliar con cobertura, c) Finca La Fátima riego subfoliar sin cobertura d) Finca el Carmen, riego suprafoliar sin cobertura.

Finalmente, en la finca El Carmen con sistema de riego suprafoliar, la ecuación ajustada a la curva de retención de humedad (Fig.46d) fue $y = -4E-05x^3 + 0,0023x^2 - 0,1229x + 6,9996$ con un contenido de humedad en su punto de inflexión de 23,00%, que se corresponde con un $pF = 4,9$ que en definitiva representa el límite máximo del umbral crítico de humedad y tensión máxima, donde las plantas pueden desarrollar su sistema radicular adecuadamente. La tendencia de la curva es de un suelo con riesgos a la degradación.

De los resultados obtenidos se deduce además que el sistema de riego suprafoliar tiene la menor disponibilidad del agua en el suelo de 23% y la tensión matricial con esta retenida el agua de un $pF = 4,9$ la más alta; además estas curvas de retención también permiten confirmar que en esta finca tuvo la menor capacidad de infiltración del agua por el grado de encostramiento lo que incide en la menor distribución de los poros.

La morfología de estas curvas de retención son bastante similares debido al tipo de textura del suelo, estructura y contenido de materia orgánica, excepto la curva de retención en la finca El Cisne, con cobertura vegetal y sistema de riego suprafoliar donde el sistema radicular de la cobertura vegetal mejoro la estructura y el contenido orgánico del suelo.

4.10. Intervalo Hídrico Óptimo (IHO)

En los suelos analizados, el IHO es bastante sensible a la variación de la densidad del suelo (D_s). Las cuatro humedades limitantes en la determinación del IHO son: a) La humedad del suelo a capacidad de campo (Θ_{cc}), b) la humedad del suelo en el punto de marchitez permanente (Θ_{PMP}), c) la humedad del suelo equivalente a una resistencia a la penetración igual a 2 Mpa (Θ_{rmp}), aunque algunos autores sitúan este punto en 1,5Mpa, y d) la humedad del suelo equivalente a porosidad de aireación (Θ_{PA}).

La variación de D_s tiene un pequeño impacto en Θ_{cc} y Θ_{PMP} , cuya diferencia se corresponde con el agua disponible (AD) = ($\Theta_{cc} - \Theta_{PMP}$). La Θ_{cc} y Θ_{PMP} correlacionaron positivamente con D_s , con valores de R^2 de 0,986; 0,249; 0,949; y 0,707 para los suelos con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar sin cobertura y subfoliar y suprafoliar con cobertura vegetal, respectivamente. El Θ_{PMP} correlacionó también positivamente con D_s , pero con valores más bajos de R^2 : 0,595; 0,026; 0,04; y 0,320 para los sistemas de riego y tipo de coberturas señalados anteriormente, en los suelos de texturas franco limosas a francos arenosas.

En fincas con sistema de riego suprafoliar con cobertura (tabla 38; fig.47), el límite superior es Θ_{cc} y el inferior Θ_{PMP} , cuando la $D_s \leq 1,31 \text{ g.cm}^{-3}$; en el suelo con textura franco arenosa. Por otro lado, Θ_{PA} sustituye a Θ_{cc} como límite superior y Θ_{rmp} sustituye a Θ_{PMP} como límite inferior cuando la densidad del suelo $D_s > 1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ hasta una

densidad crítica (dsc) igual a $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$ donde $\text{IHO} = 0$. En las fincas con sistemas de riego subfoliar y cobertura vegetal tabla 39, fig. 48, al igual que el suprafoliar la $D_s \leq 1,24 \text{ g.cm}^{-3}$ el límite superior es Θ_{cc} y el inferior es Θ_{PMP} . En cambio, cuando $1,24 \text{ g.cm}^{-3} < \Theta \leq 1,37 \text{ g.cm}^{-3}$, el límite superior de IHO es Θ_{PA} y el límite inferior es Θ_{RMP} . Para valores de $D_s > 1,37 \text{ g.cm}^{-3}$, el límite superior sigue Θ_{PA} y el límite inferior es Θ_{RMP} . Las limitaciones convergen en D_s de $1,56 \text{ g.cm}^{-3}$ y el IHO fue considerado como cero.

Tabla 38. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos con cobertura vegetal y riego suprafoliar. Finca El Cisne.

Densidad aparente (D_s)	Porosidad de aireación (P_A)	Capacidad de campo (Θ_{cc})	Punto de marchitez permanente (Θ_{PMP})	Contenido hídrico para una resistencia a la penetración de 2 MPa (Θ_{RMP})	IHO
g.cm^{-3}	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
1,1	0,485	0,412	0,250	0,175	0,162
1,2	0,447	0,421	0,242	0,205	0,179
1,3	0,409	0,414	0,244	0,234	0,165
1,4	0,372	0,401	0,250	0,266	0,106
1,5	0,334	0,385	0,234	0,333	0,001

El aumento de la D_s coincide con la disminución del Θ_{PA} para los suelos de las fincas con diversos sistemas de riego con o sin cobertura. La Θ_{PA} sustituye Θ_{cc} como factor limitante en suelos de textura media, cuando la $D_s > 1,35 \text{ g.cm}^{-3}$. Por otro lado, Θ_{RMP} , sustituye a Θ_{PMP} como factor limitante, cuando la $D_s > 1,37 \text{ g.cm}^{-3}$. En el suelo con textura media, el IHO fue definido por Θ_{PA} y Θ_{RMP} en la mayoría de los valores de D_s medidos. Los límites convergen en D_s de $1,56 \text{ g.cm}^{-3}$ y el IHO fue considerado como cero.

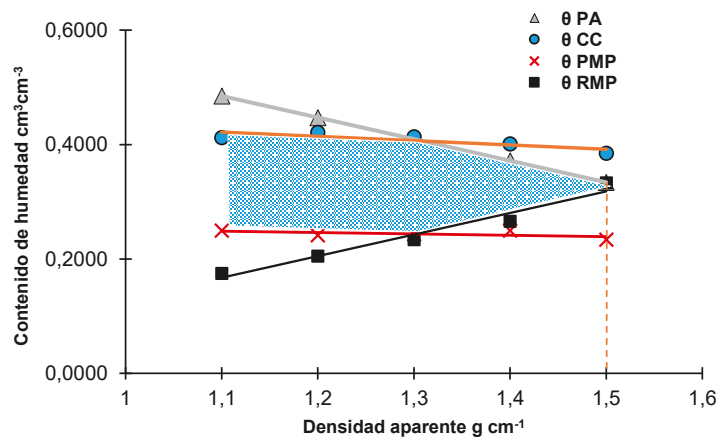


Figura 47. Representación gráfica del Intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca El Cisne, con cobertura vegetal y riego suprafoliar.

Tabla 39. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos con cobertura vegetal y riego subfoliar. Finca El Cisne.

Densidad aparente (Ds)	Porosidad de aireación (PA)	Capacidad de campo (θ_{cc})	Punto de marchitez permanente (θ_{pmp})	Contenido hídrico para una resistencia a la penetración de 2 MPa (θ_{rmp})	IHO
$g \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$
1,1	0,485	0,445	0,294	0,189	0,151
1,2	0,447	0,442	0,265	0,236	0,177
1,3	0,409	0,424	0,253	0,249	0,156
1,4	0,372	0,402	0,312	0,274	0,098
1,5	0,334	0,396	0,286	0,357	0,023

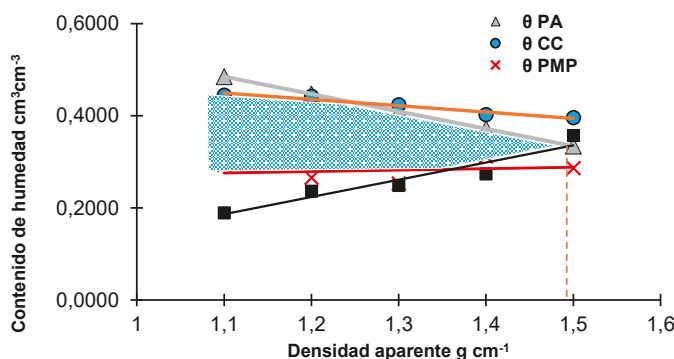


Figura 48. Representación gráfica del Intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca El Cisne, con cobertura Vegetal y riego subfoliar.

En cambio, en los suelos con sistema de riego suprafoliar, sin cobertura vegetal (tabla 40, fig.49), el agua disponible para la planta es igual al intervalo hídrico óptimo. Su contenido hídrico volumétrico es más reducido, obteniéndose para una $D_s \leq 1,37 g \cdot cm^{-3}$, un límite superior igual a θ_{cc} e inferior igual a θ_{PMP} ; para una $D_s > 1,37 g \cdot cm^{-3}$, el límite superior se mantiene igual a θ_{cc} , pero cambia el límite inferior. En la finca con sistema de riego subfoliar sin cobertura, (tabla 41, fig.50) el IHO tiene como límite superior el θ_{cc} y como inferior el θ_{PMP} hasta una $D_s \leq 1,35 g \cdot cm^{-3}$. Cuando la $D_s \geq 1,43 g \cdot cm^{-3}$, el límite superior de θ_{cc} es sustituido por θ_{PA} y el inferior es θ_{rmp} . Cuando la $D_s > 1,5$, el IHO = 0.

Tabla 40. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos sin cobertura vegetal y con riego suprafoliar.

Densidad aparente	Porosidad de aireación, θ_{PA}	Capacidad de campo, θ_{cc}	Punto de marchitez permanente, θ_{PMP}	Resistencia a la penetración θ_{rmp}	IHO
$g \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$
1,1	0,485	0,316	0,239	0,124	0,077
1,2	0,447	0,326	0,238	0,151	0,088
1,3	0,409	0,320	0,232	0,176	0,088
1,4	0,372	0,313	0,246	0,247	0,066
1,5	0,334	0,338	0,232	0,300	0,034

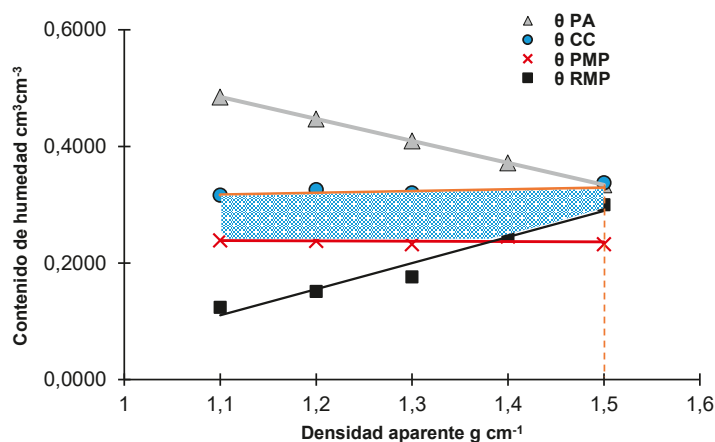


Figura 49. Representación gráfica del intervalo hídrico óptimo de los suelos de la Finca El Carmen, sin cobertura vegetal y con riego suprafoliar.

Tabla 41. Determinación del intervalo hídrico óptimo en los suelos sin cobertura vegetal, con riego subfoliar.

Densidad aparente	Porosidad de aireación, θ_{PA}	Capacidad de campo, θ_{CC}	Punto de marchitez permanente, θ_{PMP}	Resistencia a la penetración $\theta(rmp)$	IHO
$g \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$cm^3 \cdot cm^{-3}$
1,1	0,485	0,403	0,279	0,180	0,124
1,2	0,447	0,397	0,276	0,208	0,121
1,3	0,409	0,389	0,288	0,220	0,101
1,4	0,372	0,381	0,289	0,265	0,083
1,5	0,334	0,379	0,287	0,328	0,060

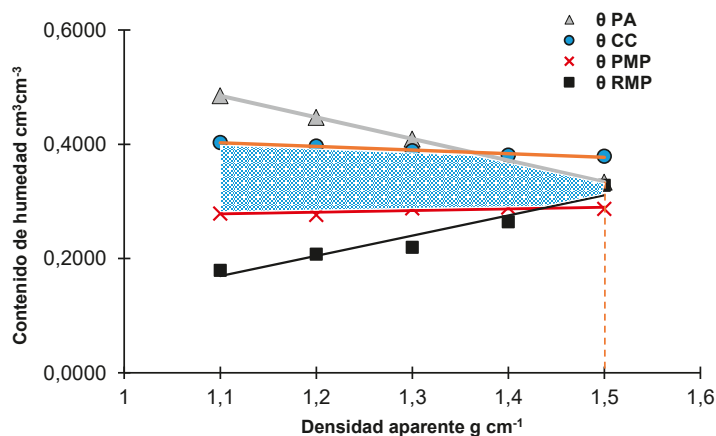


Figura 50. Representación gráfica del intervalo Hídrico Óptimo de los suelos de la Finca La Fátima, sin cobertura vegetal y con riego subfoliar.

En el suelo con cobertura vegetal, el IHO fue definido por Θ_{cc} y Θ_{PMP} para valores de $D_s \leq 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$. A mayores densidades del suelo, Θ_{rmp} sustituye a Θ_{PMP} como límite inferior, y Θ_{PA} sustituye a Θ_{cc} como límite superior. En suelos sin cobertura vegetal con los tipos de sistemas de riego, para valores de $D_s \leq 1,37 \text{ g.cm}^{-3}$, el límite superior e inferior de IHO son Θ_{cc} y Θ_{PMP} , respectivamente, y a densidad del suelo mayor de $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$, la Θ_{PA} y Θ_{rmp} sustituyen a los señalados, respectivamente.

La incorporación de la resistencia del suelo a la penetración en la definición del IHO para el crecimiento de plantas resultó un parámetro más sensible a cambios en la estructura del suelo que el agua disponible. Para los suelos con cobertura vegetal y sistemas de riego subfoliar y suprafoliar el IHO varía de 0 a $0,162 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, mientras que el agua disponible varía a medida que varía la densidad del suelo. En el suelo sin cobertura vegetal, el IHO varió desde $0,034$ a $0,077 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, mientras que los valores del agua disponible disminuyeron a medida que aumentó la densidad del suelo.

Se concluye que el IHO fue más sensible a las variaciones de la estructura del suelo que el agua disponible, reflejando mejor la calidad física del suelo. La importancia de la resistencia a la penetración en la limitación del IHO corrobora con los resultados presentados por da Silva et al. (1994).

4.11 Resistencia a la penetración (RPS)

Esta prueba se llevó a cabo con el penetrómetro digital Field scout en forma vertical, aunque algunos autores han efectuado medidas horizontales. En tabla 42 y figura 51 se observa que los valores de la resistencia a la penetración, en los suelos con o sin cobertura vegetal, tanto en los sistema de riego por aspersión subfoliar ,y suprafoliar con cobertura, la mayor resistencia a la penetración se registró en la capa de 10- 20cm del perfil de suelo (RPS=975,75; 923,88 y 1085,89 Kpa, respectivamente). Este valor se extiende hasta 20-30 cm en el sistema de riego suprafoliar sin cobertura (RPS= 942,23 Kpa), coincidente con la mayor presencia de arcilla en esos estratos. Estos valores pueden ser considerados como críticos en el cultivo de banano, como señala Taylor et al, (1966), donde las raíces presentan dificultad para atravesar la capa inhibidora, desarrollándose superficialmente, y restringiendo la absorción de nutrientes y el contenido volumétrico del agua en el perfil.

Horn y Smucker (2005) indican que la resistencia a la penetración está en relación con el aumento de la densidad y disminución del contenido de humedad y que ello determina un aumento de cohesión de partículas del suelo; así, la resistencia aumenta cuando el contenido de humedad disminuye valores similares a lo señalado por Secco, (2003); Díaz J., y Pierce (1996), Imhoff (2002). Además, Eracilda (2012) señala que la degradación de la estructura afecta hasta en un 50% la longitud radicular, cuando RMP es de 1.1 Mpa.

A pesar de esos señalamientos, los valores obtenidos concuerdan con lo señalado por Estupiñan et al. (2009), que mencionan que los valores de resistencia a la penetración oscilan entre 1.0 y 1.2 MPa, y que valores por encima de 1.7 MPa afectan el normal desarrollo del sistema radicular, lo que coadyuva lo indicado por Navarro (1994), que sugiere esta se mantenga por debajo de 1 MPa aunque existen especies vegetales que requieren valores menores, como el caso del banano que por las características de su sistema radicular necesita valores alrededor de 0.8Mpa (Fig.51).

Los valores de resistencia obtenidos confirman lo expresado por Estupiñan et al. (2009), que indican que a mayor densidad aparente existen menos espacios porosos y directamente proporcionales a la resistencia de la penetración que dificulta el movimiento del agua. Por otra parte, se observó que en las plantaciones de banano volcadas, el cormo del tallo tenía fracciones de sus raíces con longitud alrededor de 15 cm, coincidente con la capa donde el valor de RPS es más alta.

Los valores del coeficiente de variación determinan que la RPS no es homogénea ni en el perfil del suelo, ni tampoco en los sistemas de riego y el tipo de cobertura. Sin embargo, sus valores son inferiores al 25%, que se lo considerado como normal según la escala de Pearson.

Tabla 42. Resistencia a la penetración (KPa) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Riego vs cobertura	Profundidad del suelo (cm)					Promedio	CV%
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50		
SPF-CC	779,22	1085,89	928,67	700,55	666,89	832,24 a	20,91
SPF-SC	608,62	882,73	942,23	858,10	992,21	856,78 a	17,30
SBF-CC	791,67	975,75	886,75	622,00	668,00	788,83 a	18,69
SBF-SC	797,44	923,88	835,83	820,60	678,71	811,29 a	10,87
Promedio	744,24 a	967,06 b	898,37 a	750,31 a	751,45 a	822,29	16,94
Desv.est	90,73	87,89	47,91	108,78	160,60	29,03	4,31
CV%	12,19	9,09	5,33	14,50	21,37	3,53	25,44

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. En la parte superior, se han identificado 2 grupos homogéneos. Existen diferencias estadísticamente significativas entre la resistencia a la penetración entre el estrato de 10 – 20 cm respecto a los otros estratos en los sistemas de riego y tipo de cobertura. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

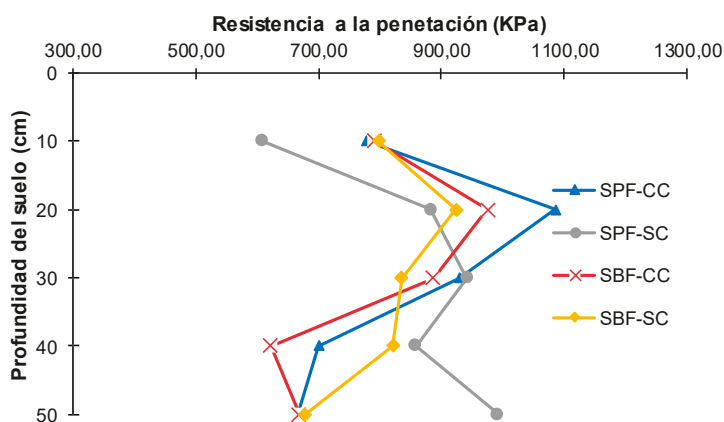


Figura 51. Resistencia a la penetración (KPa) en el perfil de suelos con sistemas de riego subfoliar, suprafoliar con y sin cobertura vegetal.

Tabla 43 .Análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a la penetración del suelo (KPa) en los perfiles de suelos con incidencia de riegos presurizados con y sin cobertura vegetal.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:cobertura	2760,31	1	2760,31	0,23	0,6384
B:profundidad	172153	4	43038,1	3,61	0,0344
C:riego	9878,12	1	9878,12	0,83	0,3793
RESIDUOS	154988	13	11922,1		
TOTAL (CORREGIDO)	339779	19			

En la tabla 43, el ANOVA descompone la variabilidad de RPS en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (p, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que el valor de -P respecto a la profundidad, es menor que 0,05 este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre RPS con un 95,0% de nivel de confianza,

evidenciándose lo señalado por Horn y Smucker (2005) que la resistencia está en relación con el aumento de la densidad y disminución del contenido de humedad y que ello determina un aumento de cohesión de partículas del suelo.

Este comportamiento de la resistencia en los suelos con sistema de riego presurizado con y sin cobertura vegetal es debido probablemente a la forma pedogénica como se compacta los suelos, además de los ciclos de humedecimiento que se dan en este cultivar, a veces con riego frecuentes, el efecto de las gotas de aguas sobre los agregados de baja estabilidad estructural, provocando una lixiviación de las partículas finas y transformación de óxidos y periodos de secado. Por otra parte, la FAO (2000), afirma que la capa compactada tiene efectos más negativos a los 10 cm, que a 20 o 30cm de profundidad, y está caracterizada por la reducción, continuidad y cantidad de poros, según lo señala Reyes (2010).

4.11.1 Propiedades físicas y la resistencia a la penetración del suelo (RPS)

En las tablas 44 y 45 se presentan las medidas de posición media, valores máximos y mínimos, asimetría y curtosis, que permite conocer la dispersión de los datos y si estos pertenecen a una misma población (Siqueira et al., 2008); por otro lado, también constan las medidas de dispersión: desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, que dan información de la variabilidad de los datos obtenidos. Esta información de las medidas de posición permite deducir que dentro del conjunto de datos obtenidos existen datos anómalos. Estos valores extremos modifican sensiblemente la distribución de los datos, siendo la asimetría y curtosis lo más sensible a su presencia (García-Tomillo 2014).

La asimetría y curtosis señaladas en tabla 45 permiten conocer si la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal (Gaussiana), esto ocurrirá si toman valores de 0 y 3 respectivamente; se admite de modo práctico que una distribución de frecuencias está cerca de la normalidad cuando el coeficiente de asimetría es menor a 1. Se resumen todos los valores medios de las propiedades físicas de los suelos con y sin cobertura vegetal (tabla 44), en las diferentes capas del perfil del suelo. Se resalta que a mayor contenido de limo, mayor densidad aparente y por consiguiente mayor resistencia a la penetración y menor contenido de humedad (Letey, 1985; Pilatty y Orellana, 1993; Da silva et al., 1994).

Tabla 44. Propiedades físicas de cinco estratos de 10 cm de un perfil de suelo de las fincas, con sistemas de riego subfoliar y suprafoliar y cobertura vegetal.

Propiedad	Sin cobertura vegetal					Con cobertura vegetal				
	Profundidad del suelo (cm)									
	0-10	108-20	20-30	30-40	40-50	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
<i>Sistema de riego subfoliar</i>										
Øv (%)	34,169	26,346	24,469	27,547	26,077	24,556	22,689	23,298	22,136	23,958
RPS (kPa)	797,444	923,878	835,833	820,603	678,711	791,667	975,748	886,752	622,000	668,000
Ds (g.cm ⁻³)	1,313	1,416	1,371	1,356	1,357	1,383	1,461	1,430	1,363	1,310
Dr (g.cm ⁻³)	2,233	2,316	2,358	2,246	2,248	2,483	2,520	2,477	2,359	2,603
SE (g.m ⁻²)	6,941	8,114	8,908	7,144	7,780	6,840	6,459	6,103	7,473	7,927
ØPA (%)	0,000	0,000	5,670	0,070	2,390	9,070	7,150	8,500	10,660	16,260
MO (%)	2,410	1,510	0,190	0,000	0,000	2,660	2,170	1,360	0,840	0,000
PT (%)	40,396	38,730	41,343	39,375	39,542	44,260	41,497	42,090	41,606	49,180
Arena (%)	49,000	50,500	54,700	51,300	48,000	51,000	52,400	52,500	46,700	48,900
Limo (%)	39,000	39,900	37,000	37,000	39,000	34,000	32,400	34,500	43,000	38,600
Arcilla (%)	12,000	9,600	8,300	11,700	13,000	15,000	15,200	13,000	10,300	12,500
<i>Sistema de riego suprafoliar</i>										
Øv (%)	26,128	25,910	24,016	25,696	21,669	28,573	25,212	24,274	24,504	27,492
RPS (Kpa)	608,622	882,728	942,226	858,097	992,214	779,222	1085,887	928,672	700,554	666,889
Ds (g.cm ⁻³)	1,401	1,407	1,428	1,419	1,331	1,380	1,420	1,397	1,372	1,324
Dr (g.cm ⁻³)	2,188	2,360	2,209	2,321	2,350	2,320	2,350	2,497	2,438	2,447
SE (g.m ⁻²)	6,072	6,913	5,623	5,760	6,336	6,611	6,794	6,197	7,409	9,799
ØPA (%)	0,000	1,690	0,000	0,010	12,050	0,000	2,190	7,330	8,780	8,610
MO (%)	1,980	0,620	0,000	0,000	0,000	2,600	2,070	0,850	0,220	0,000
PT (%)	35,445	40,290	35,101	38,632	42,931	40,186	39,142	43,080	43,167	45,785
Arena (%)	48,500	53,000	51,000	54,000	54,700	48,900	49,500	55,200	51,000	49,500
Limo (%)	41,000	38,000	44,500	39,000	42,000	43,200	42,000	38,500	42,000	44,500
Arcilla (%)	10,500	9,000	4,500	7,000	3,300	7,900	8,500	6,300	7,000	6,000

4.11.2 Resultado de la estadística descriptiva y matriz de correlación de las propiedades físicas y la RPS

Tabla 45. Resultados estadísticos descriptivos de las propiedades físicas de los suelos de las fincas con sistemas de riego suprafoliar, subfoliar con o sin cobertura vegetal a la profundidad de 0-50 cm (N=número de muestras).

Propiedad	Unidad	N	Media	Varianza	σ	Máximo	Mínimo	Rango	Asimetría	Curtosis
Øp	%	20	18,442	5,281	2,298	26,024	15,530	10,494	1,951	5,576
Øv	%	20	25,436	7,483	2,736	34,169	21,669	12,500	1,676	4,670
RPS	Kpa	20	822,287	17882,884	133,727	1085,887	608,622	477,265	0,031	-0,787
Ds	g.cm ⁻³	20	1,382	0,002	0,042	1,461	1,310	0,151	-0,153	-0,700
Dr	g.cm ⁻³	20	2,366	0,013	0,113	2,603	2,188	0,415	0,297	-0,590
SE	g. m ⁻²	20	7,060	1,117	1,057	9,799	5,623	4,176	1,029	1,087
PT	%	20	41,089	10,585	3,253	49,180	35,101	14,079	0,423	1,179
ØPA	%	20	5,022	25,001	5,000	16,260	0,000	16,260	0,570	-0,664
MO	%	20	0,974	1,032	1,016	2,660	0,000	2,660	0,495	-1,440
Arena	%	20	51,015	5,980	2,445	55,200	46,700	8,500	0,224	-0,882
Limo	%	20	39,455	11,581	3,403	44,500	32,400	12,100	-0,389	-0,401
Arcilla	%	20	9,530	11,192	3,345	15,200	3,300	11,900	-0,007	-0,736

Tabla 46. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas del suelo con sistema de riego suprafoliar, subfoliar, con y sin cobertura vegetal a la profundidad de 0-50 cm.

Variables físicas		Øp	ØPA	Øv	Limo	Arcilla	Arena	Ds	Dr	MO	PT	RPS	SE
Correlación	Øp	1.000											
<i>Valor-P</i>		<i>0.000</i>											
Correlación	ØPA	-0.427	1.000										
<i>Valor-P</i>		<i>0.060</i>	<i>0.000</i>										
Correlación	Øv	0.974	-0.588	1.000									
<i>Valor-P</i>		<i>0.000</i>	<i>0.006</i>	<i>0.000</i>									
Correlación	Limo	0.170	-0.126	0.121	1.000								
<i>Valor-P</i>		<i>0.475</i>	<i>0.596</i>	<i>0.610</i>	<i>0.000</i>								
Correlación	Arcilla	0.088	0.073	0.111	-0.738	1.000							
<i>Valor-P</i>		<i>0.714</i>	<i>0.761</i>	<i>0.642</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>							
Correlación	Arena	-0.356	0.076	-0.320	-0.383	-0.342	1.000						
<i>Valor-P</i>		<i>0.124</i>	<i>0.750</i>	<i>0.169</i>	<i>0.096</i>	<i>0.140</i>	<i>0.000</i>						
Correlación	Ds	-0.549	-0.369	-0.349	-0.302	0.089	0.299	1.000					
<i>Valor-P</i>		<i>0.012</i>	<i>0.109</i>	<i>0.131</i>	<i>0.195</i>	<i>0.710</i>	<i>0.200</i>	<i>0.000</i>					
Correlación	dr	-0.391	0.797	-0.452	-0.398	0.227	0.243	-0.014	1.000				
<i>Valor-P</i>		<i>0.089</i>	<i>0.000</i>	<i>0.045</i>	<i>0.082</i>	<i>0.335</i>	<i>0.301</i>	<i>0.954</i>	<i>0.000</i>				
Correlación	MO	0.210	-0.237	0.311	-0.267	0.464	-0.263	0.301	0.004	1.000			
<i>Valor-P</i>		<i>0.375</i>	<i>0.315</i>	<i>0.182</i>	<i>0.255</i>	<i>0.039</i>	<i>0.263</i>	<i>0.197</i>	<i>0.987</i>	<i>0.000</i>			
Correlación	PT	-0.041	0.857	-0.196	-0.190	0.151	0.057	-0.532	0.849	-0.159	1.000		
<i>Valor-P</i>		<i>0.864</i>	<i>0.000</i>	<i>0.408</i>	<i>0.423</i>	<i>0.524</i>	<i>0.812</i>	<i>0.016</i>	<i>0.000</i>	<i>0.504</i>	<i>0.000</i>		
Correlación	RPS	-0.291	-0.192	-0.190	-0.209	-0.228	0.602	0.527	0.042	0.147	-0.229	1.000	
<i>Valor-P</i>		<i>0.214</i>	<i>0.417</i>	<i>0.422</i>	<i>0.378</i>	<i>0.333</i>	<i>0.005</i>	<i>0.017</i>	<i>0.860</i>	<i>0.537</i>	<i>0.331</i>	<i>0.000</i>	
Correlación	SE	0.264	0.269	0.158	0.142	0.038	-0.250	-0.526	0.203	-0.275	0.476	-0.403	1.000
<i>Valor-P</i>		<i>0.261</i>	<i>0.251</i>	<i>0.507</i>	<i>0.550</i>	<i>0.874</i>	<i>0.289</i>	<i>0.017</i>	<i>0.391</i>	<i>0.241</i>	<i>0.034</i>	<i>0.078</i>	<i>0.000</i>

La matriz de correlaciones de las propiedades físicas se observa en tabla 46, resaltando que existe una alta correlación positiva entre el contenido volumétrico y el contenido de humedad en peso ($R=0.97$) y negativa del primero con el porcentaje de aireación ($R=-0.588$); el porcentaje de aireación se correlaciona directamente con la densidad real ($R=0.797$); la arcilla se correlaciona negativamente con el contenido de limo ($R=-0.738$); y positivamente con la materia orgánica ($R=0.464$); la arena se correlaciona positivamente con la RPS ($R=0.602$); y la densidad aparente se correlaciona directamente con la RPS y negativamente con SE y porcentaje de porosidad, es decir, el valor de la porosidad aumenta cuando la densidad aparente disminuye.

En resumen, la materia orgánica, limo y la arcilla se correlacionan positivamente con la densidad y negativamente con la humedad. La arena presenta una correlación positiva con la densidad y negativa con la humedad. En efecto mayores niveles de materia orgánica y partículas finas contribuyen con menores pesos en la estimación de la densidad y aumentan la capacidad de los suelos en almacenar agua; por el contrario, mayores contenidos de partículas gruesas como las arenas tributan con mayor peso en la densidad y disminuye la capacidad de almacenaje del agua en el suelo (Díaz, 2000).

4.12 Compactación inducida de suelos en laboratorio. Prueba Proctor

En las figuras 52 a, b, c, d, se presentan las gráficas y ecuaciones de regresión obtenidas para los suelos de las fincas, que representan la relación entre la densidad de suelo crítica y la humedad. Se observa, además, los valores más altos de $R^2=0,999$, que indican la bondad de ajuste y la precisión de las ecuaciones para predecir cuando el número de muestras es elevado.

Por otro lado, este coeficiente indica que la humedad incide en alto porcentaje el comportamiento de la densidad, cuando la presión se mantiene constante sobre un suelo. Se puede señalar las diferencias de las ecuaciones para los suelos de las fincas analizadas aun con la misma clase textural. Estas variaciones están en correspondencia directa con las diferencias en la granulometría y contenidos de materia orgánica. Por otro lado, es necesario indicar que los valores de humedad crítica encontrados en esta investigación pueden ser considerados como referenciales a objeto de recomendar no introducir maquinaria agrícola al campo para la construcción de sistemas de drenaje, cuando la humedad del suelo se encuentre cercana o superior a estos valores debido a que aumentarían los riesgos de compactación.

Al aumentar los contenidos de arcilla, limo y materia orgánica la pendiente de una tangente en un punto cualquiera de la curva de compactación es más suave, señalando menor variación en la densidad por efectos de cambios en la humedad, mientras mayores contenidos de arena señalan mayores cambios en la densidad para variaciones de la humedad, haciendo la pendiente de la curva más pronunciada. Altos contenidos de partículas finas y materia orgánica actúan como cementantes manteniendo unidos los agregados y confiriéndole una mayor capacidad de soporte a las presiones por lo que los cambios de densidad son menores (Saone, 1990).

Por otra parte, las partículas de arenas se caracterizan por una alta dispersión, baja cohesión y una mayor capacidad de empaquetarse de manera más compacta a ser sometidos a presiones, razón por la cual variaciones de humedad producen tasas altas de densidad.

El análisis precedente señal que los suelos con mayores contenidos de arena presentan mayor susceptibilidad a compactarse que los suelos con mayores contenidos de partículas finas y materia orgánica. Sin embargo, es necesario considerar que el campo los suelos arenosos pierden rápidamente la humedad disminuyendo de esta manera los riesgos a compactarse.

4.12.1 Densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptima en fincas con sistema de riego suprafoliar, con o sin cobertura vegetal

La densidad crítica encontrada en los suelos con un sistema de riego suprafoliar en el testigo fue de 1.73 g.cm^{-3} (Fig.52a), con una humedad óptima de 14,54%, valores que pueden deberse a su bajo contenido de materia orgánica presente (1,3%), dado las condiciones de alta humedad y temperatura en la zona. Este suelo tiene un 26,3% de limo y un 69,3% de arena, siendo sensible a la compactación. La pendiente de la tangente en un punto cualquiera de la curva es moderada. Su curva es un poco cerrada y el rango de contenido de humedad es limitado de 5 a 20%.

Tras la aplicación de una enmienda de yeso agrícola en esta finca con textura franco arenosa se obtuvo una densidad crítica de $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$ y una humedad óptima de 19,46% (Fig. 52b). De esto se deduce la acción del yeso en incrementar el contenido de materia orgánica, esta permite una mayor retención de la humedad (Aldrich, 1951). La curva tiene una pendiente pequeña y en cualquier punto de la misma su valor es bajo, por lo que estos suelos tienen mayores contenidos de limo, son menos susceptible a la compactación.

Un comportamiento fue observado en la misma finca efectuando la roturación (Fig. 52c), con la diferencia de que los niveles de humedad en este suelo variaron de 12,5 a 25%. En este caso, los porcentajes de arena y de contenido de materia orgánica fueron elevados, de 65% y 2,12%, respectivamente. Los valores de densidad crítica obtenidos fueron de $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$, y la humedad óptima de 18,10% (tabla 47). Este mejorador del suelo permite un cierto ingreso de materia orgánica en el perfil, aumentando su contenido, situación similar a la citada por Mon (2007), que efectuó subsolado hasta los primeros 25cm de profundidad y observó una densidad de suelo crítica igual a $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$, superior al testigo, producto del incremento del contenido orgánico del suelo. El porcentaje de

arcilla fue de 10,4%, y la curva es de ligera pendiente por lo que es más sensible a la compactación.

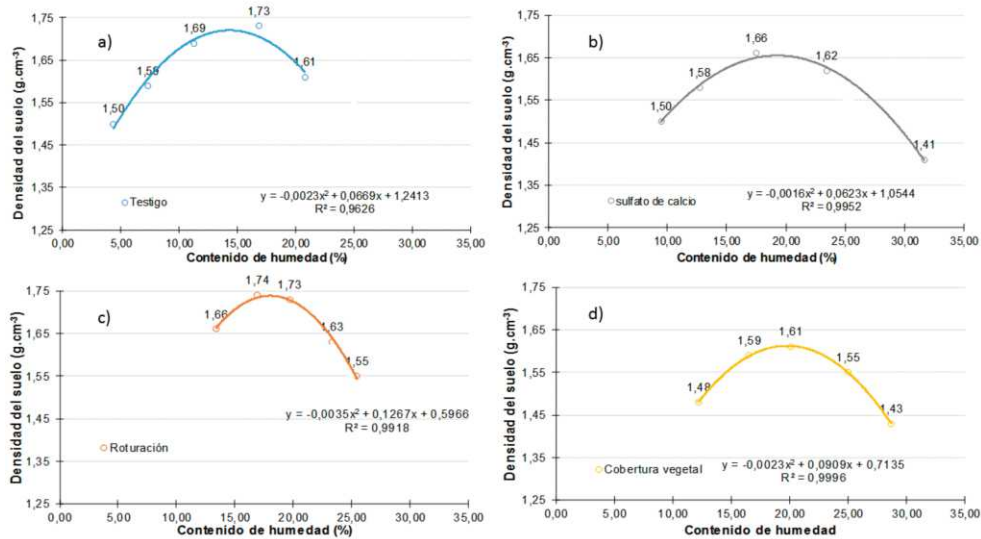


Figura 52. Densidad de suelo crítica en riego suprafoliar; **a)** Testigo (Finca El Carmen), **b)** Sulfato de calcio (Finca El Carmen), **c)** Roturación (Finca El Carmen) y **d)** Cobertura vegetal (Finca El Cisne).

El rango de humedad aumenta de 10 a 30%, valores bastante similares a los suelos con cobertura vegetal que presentan las menores densidades críticas de 1,61 g.cm⁻³ y los mayores porcentajes de humedad óptima de 19,76% (Fig.52d).

4.12.2 Densidad de suelo crítica (y contenido de humedad óptima en finca con sistema de riego subfoliar, con o sin cobertura vegetal)

En la figura 53a, se evidencia que el contenido de materia orgánica fue mayor respecto al de las fincas con sistema de riego suprafoliar, lo que incidió en una densidad de suelo crítica más baja en todos los tratamientos, con valores de 1,60 g.cm⁻³, la humedad óptima fue 17,27%. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Reyes (2010), en suelos cuya densidad fue de 1,60 g.cm⁻³ y el contenido de materia orgánica de 2,64% en suelos francos. La pendiente de la tangente en un punto cualquiera de la curva es pequeña. Estos suelos tienen un 46% de limo, por lo que son menos sensibles a la compactación.

La curva de densidad crítica del suelo con el tratamiento de yeso agrícola fue 1,60 g.cm⁻³ y la humedad óptima de 18,43%. La curva se observa plana, y por lo tanto la

pendiente de la tangente a la curva en cualquier punto es baja, valor concordante a lo señalado por Reyes (2010), que indican que las curvas con menor pendiente son suelos menos sensibles a la compactación debido a la presencia de coloides que permiten una mayor retención de agua de 10 a 32,5% de humedad. Según García (2009), los suelos de texturas finas necesitan más agua para compactarse que los de texturas gruesas, por lo que los valores determinados se atribuyen a la aplicación del yeso que inciden en los niveles de materia orgánica (Fig. 53b).

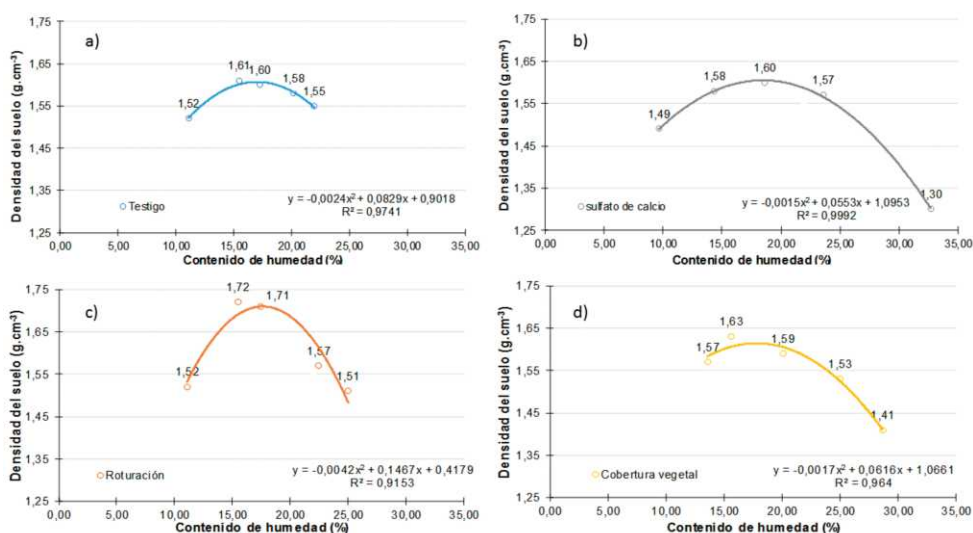


Figura 53. Densidad de suelo crítica, en riego subfoliar; a) Testigo (Finca La Fátima), b) Sulfato de calcio (Finca La Fátima), c) Roturación (Finca La Fátima) y d) Cobertura vegetal (Finca El Cisne).

Como se puede observar en la figura 53c, el efecto de la roturación determina una curva cerrada. Estos suelos tienen un 35,6% de limo; por lo tanto, las pendientes de la tangente en cualquier punto en la curva es alto, lo que determina suelos más susceptible a la compactación; la roturación permitió elevar el contenido de materia orgánica al suelo en un 2,19%, mejorando por consiguiente la porosidad y como lo señala González-Iglesias (2009) esto favorece a la formación de agregados debido al mayor contenido de carbono, disminuyendo la densidad crítica a $1,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y una humedad óptima de 17,46%.

La densidad de suelo crítica en la finca con cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar fue de $1,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, y el contenido de humedad óptimo es de 16,55% (tabla 47). La pendiente de la tangente en un punto cualquiera de la curva es baja, lo que determina

suelos menos susceptibles a compactarse. Tienen un 45% de limo (Fig. 53d), un contenido de materia orgánica de 2,05%, y un alto contenido de arena de 51,8%.

Tabla 47. Ensayos Proctor para suelos bananeros, con sistemas de riegos presurizados, bajo la aplicación de mejoradores. Cuadro de densidades críticas y contenido de humedad óptimo.

Sistemas de riego	Predios	Tratamientos	Dsc	Hm%	Arena %	Limo%	Arcilla%	MO%
Suprafoliar	El Carmen	Testigo	1.73	14.54	69,3	26.3	4.4	1.3
	El Carmen	Sulfato de calcio	1.66	19.46	63.6	27	9.4	1.42
	El Carmen	Roturación	1.74	18,10	65	24.6	10.4	2.12
	El Cisne	Cobertura vegetal	1.61	19.76	45.3	46.6	8.1	1.83
Subfoliar	La Fátima	Testigo	1.60	17,27	41.6	46	12.4	1.96
	La Fátima	Sulfato de calcio	1.60	18.43	50	36.5	13.5	2.03
	La Fátima	Roturación	1.70	17,46	51.8	35.6	12.6	2.19
	El Cisne	Cobertura vegetal	1.65	16.55	44.8	45	10.2	2.05

Hm. opt. = Humedad óptima

Dsc = Densidad suelo crítica

En términos generales se puede señalar que la composición granulométrica del suelo y el contenido de materia orgánica inciden en el comportamiento de la curva y que la aplicación del sulfato de calcio ayudo en mejorar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

4.13 Índice de encostramiento y estabilidad estructural de los suelos

Tabla 48. Índice de estabilidad estructural (IEE) e índice de encostramiento (IE) de los suelos en las fincas del estudio.

Tratamiento	Arcilla (%)	Limo (%)	M.O (%)	IEE	IE
Testigo-Suprafoliar	2,0	38,0	1,99	4,97	1,96
Testigo-Subfoliar	16,0	41,0	2,42	4,25	1,15
SPF + QUIMICO	9,0	29,0	2,00	5,27	1,12
SBF+ QUIMICO	13,0	32,0	2,28	5,07	1,00
SPF + FISICO	9,0	29,0	2,68	7,05	0,91
SBF+ FISICO	12,0	31	2,82	6,57	0,87
SPF + BIOLOGICO.	7,83	44,45	2,62	5,01	1,47
SBF+BIOLOGICO	34,1	15,9	2,67	5,35	0,29

El índice de estabilidad estructural (Tabla 48), para el área testigo, presenta valores inferiores a 5, por lo que se considera que estos son suelos degradados. En el resto de tratamientos, el IEE es de 5-7, lo que los convierte en suelos con altos riesgos a la degradación física por compactación. Sin embargo, es necesario hacer énfasis en que con el tratamiento físico por roturación del suelo, los valores aumentaron a 7,05 y 6,57, lo que los ubica como suelos con moderado riesgo a la compactación. Por otro lado, los mejoradores biológicos y químicos no influyeron mayormente en mejorar la estabilidad estructural.

En la misma tabla se aprecia el índice de encostramiento de los suelos, que en el testigo del sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, tienen un valor $IE > 1,5$, por lo que ubica a estos suelos en una intensa formación de costras en la superficie, lo que hace que gran parte del agua de riego con estos sistemas quede en la superficie formando charcos o se forman escorrentías hacia los sistemas de drenaje. En cambio, con los otros tratamientos, este índice fue inferior a 1,5, y son suelos que no forman costras. Estos resultados concuerdan con lo que señala Pagliai (2003), que indica que los suelos más propensos al sellamiento son aquellos con texturas franco arenosas con alto contenido de arenas finas y muy finas, así como también los que tienen alto contenido de limo por ser este fácilmente dispersable. Por otra parte, lluvias intensas, cuyas gotas con diámetros de regular grosor alcanzan altas energías cinéticas, tienen potencial para producir sellado y encostramiento de los suelos.

4.14 Infiltración del agua en el suelo

La infiltración del agua posee un rol fundamental en los procesos de escorrentía como respuesta a una precipitación o intensidad pluviométricas producida por los sistemas de riego. En tablas 49 y 50, se presenta las ecuaciones de la infiltración acumulada y de la velocidad de infiltración de los suelos con los sistemas de riego subfoliar y suprafoliar. A partir de estas ecuaciones se determinó que la velocidad de infiltración en estos suelos es de 10,358 y 7,744 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, para sistemas de riego suprafoliar con y sin cobertura vegetal, respectivamente; estos valores son bajos respecto a la intensidad pluviométrica de los aspersores, de 12,77 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, lo que provoca escorrentía y erosión de las partículas más finas del suelo, creando además microrelieves y microdepresiones que van trasladando

esas partículas, por la acción de la velocidad de agua de un determinado riego o precipitación, hacia sitios más bajo o los canales de drenaje.

En cambio, en las fincas con sistema de riego subfoliar la velocidad de infiltración (I_b) es de 2,87 y 6,094 mm.h^{-1} , con y sin cobertura vegetal, respecto a la intensidad pluviométrica (I_p) que producen este sistema de riego de 3,567 mm.h^{-1} , se deduce que en estos suelos no existen problemas de escurrimiento y sellamiento superficial dado que estas láminas, alcanzan a infiltrar el agua que genera este sistema de riego. Teniendo en cuenta que en el diseño de sistema de riego siempre debe considerarse, en la selección de aspersores, que la intensidad pluviométrica que estos producen debe ser inferior a la velocidad de infiltración básica ($I_p < I_b$).

En las figuras 54 a 57, están representadas gráficamente la velocidad de infiltración instantánea, que esta se vuelve casi constante (la tangente a la curva paralela al eje X) se determina en el eje Y la velocidad de infiltración básica.

Tabla 49. Ecuaciones de la infiltración acumulada y velocidad de infiltración, de los suelos de las fincas (cm.minuto^{-1}).

Infiltración	Suprafoliar Con Cobertura	Subfoliar Con Cobertura	Suprafoliar Sin Cobertura	Subfoliar Sin Cobertura
Infiltración acumulada Ecuación de la infiltración Instantánea	$I_{cum} = 1,458 T^{-0.470}$ $I = 5,830 T_o^{-0.422}$	$I_{cum} = 1,428 T^{-0.494}$ $I = 5,711 T_o^{-0.488}$	$I_{cum} = 0,221 T^{-0.569}$ $I = 0,885 T_o^{-0.275}$	$I_{cum} = 2,378 T^{-0.417}$ $I = 9,508 T_o^{-0.671}$

Tabla 50. Velocidad de infiltración del suelo de las fincas, con sistemas de riego presurizado (mm.hora^{-1}).

Repeticiones	Suprafoliar Con Cobertura	Subfoliar Con Cobertura	Suprafoliar Sin Cobertura	Subfoliar Sin Cobertura
Infiltración acumulada	2,128	1,889	0,198	4,312
Velocidad de infiltración (mm.h^{-1})	10,358	7,744	2,870	6,094

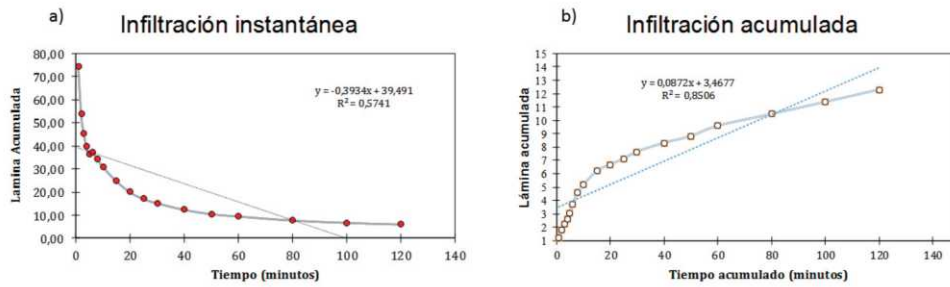


Figura 54.a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

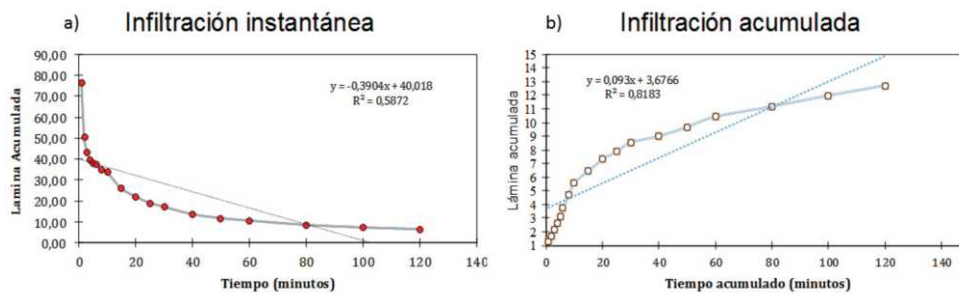


Figura 55.a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

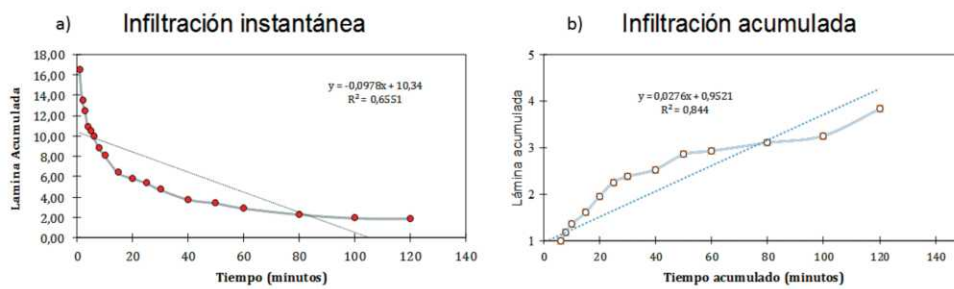


Figura 56.a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.

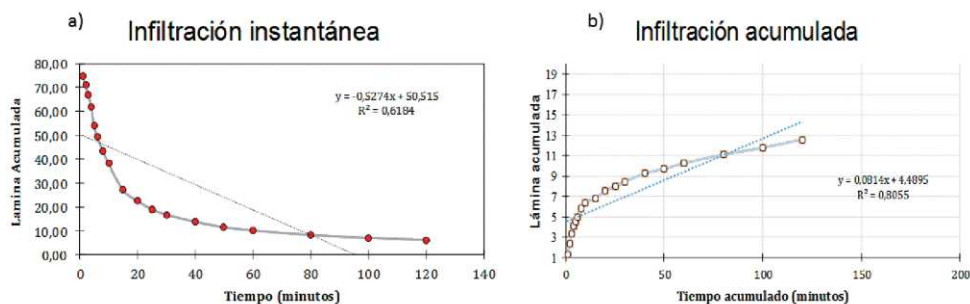


Figura 57.a) Velocidad de infiltración instantánea y b) Infiltración acumulada de un riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.

4.15 Evaluación de los sistemas de riego en las fincas de estudio

La evaluación del funcionamiento hidráulico y la calidad del riego en los sistemas de riego presurizado, a partir de la influencia que puede tener la presión de trabajo del aspersor, el tipo y marca, sobre la eficiencia de los sistemas de riego presurizados, ha sido tema de investigación de diversos autores en las más diversas condiciones edafoclimáticas (Ortiz et al., 2010; Yacoubi et al., 2012; Zhao et al., 2012; Zhang Lin et al., 2013) entre otros.

El estudio de ciertos indicadores que influyen en la calidad de aplicación del agua de riego por aspersión en el cultivo de banano, permite conocer en qué medida estos sistemas de riego influyen en la degradación de los suelos.

4.15.1 Intensidad pluviométrica de los sistemas de riego subfoliar y suprafoliar

El comportamiento de las intensidades pluviométricas de los sistemas de riego suprafoliar (Fig.58 a, b) y subfoliar (Fig.58 c, d) respecto a los valores medios, son totalmente irregulares, lo que implica que existen áreas bajo riego que reciben mayor intensidad pluviométrica que otros, y por lo tanto mayor impacto de gota de agua sobre el suelo y causar problemas en la degradación de los suelos, adicionado en algunas ocasiones por mal diseño o falta de drenaje.

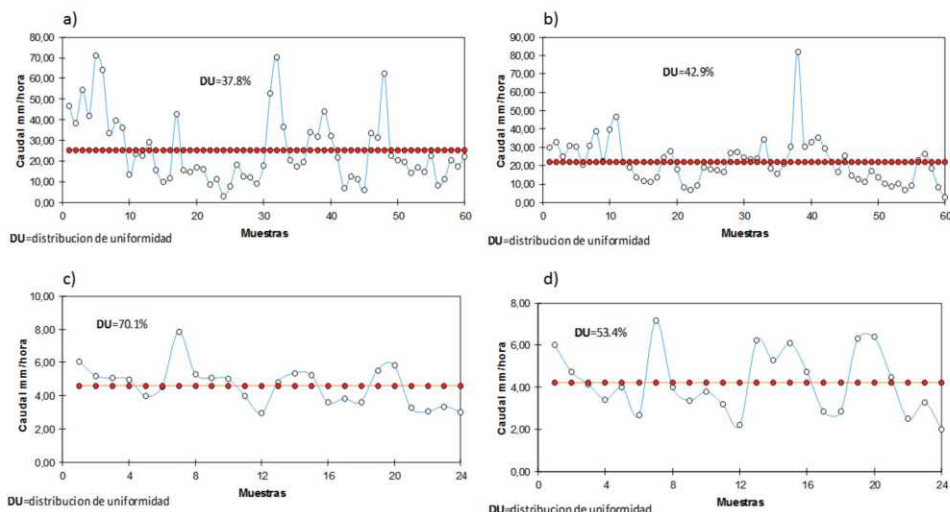


Figura 58. Distribución de la intensidad pluviométrica; a) riego suprafoliar sin cobertura (finca El Carmen), b) riego suprafoliar con cobertura (finca El Cisne), c) riego subfoliar sin cobertura (finca La Fátima), d) riego subfoliar con cobertura (finca El Cisne).

4.15.2 Coeficiente de uniformidad, uniformidad de distribución y coeficiente de variación de la descarga de los aspersores

En tabla 51, se observa que el coeficiente de uniformidad (CU) en todos los sistemas de riego es inferior a 81-84%, establecido por (Keller 1990) y Christiansen como normales. Lo mismo sucede con la distribución de la uniformidad (DU) de la lámina de agua en el suelo, sus valores no están en el rango de 70 -80% establecido por el mismo autor dentro de los procesos de evaluación de los sistemas de riego. Solo se considera como una distribución normal en el sistema de riego por aspersión subfoliar y suelo sin cobertura, cuyo valor es de 70,1%.

Tabla 51. Evaluación de los coeficientes de uniformidad (CU), variación (CV) y distribución de uniformidad (DU) de los sistemas de riego presurizados.

Coefficientes	Riego suprafoliar con cobertura	Riego subfoliar con cobertura	Riego suprafoliar sin cobertura	Riego subfoliar sin cobertura
CU%	58,57	70,44	47,80	79,48
DU%	42,90	53,40	37,8	70,10
CV%	55,68	35,39	65,31	25,29

El coeficiente de variabilidad tiene valores de 25,29% en el riego subfoliar sin cobertura, y 65,31% en el suprafoliar sin cobertura. Estos valores son superiores a 20%, lo que es considerado por Pearson como el límite de una variabilidad normal. Se deduce entonces que los sistemas de riego evaluados están operando en forma no eficiente que provocan intensidades pluviométricas en ciertas áreas demasiado alta, que ocasionan grandes pérdidas de agua por escorrentía superficial, y colateralmente producen sellamiento de la capa superior, degradando los suelos.

4.15.3 Curva radial de descarga de los aspersores utilizados en riego subfoliar y suprafoliar en las fincas

En condiciones de viento en calma la distribución del agua es circular e igual en todas las direcciones alrededor del aspersor. Se tomó un radio de descarga alrededor del aspersor en las cuatro direcciones considerando el norte geográfico y efectuando la prueba en la hora en que la velocidad del viento sea menor a $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, debido a que a mayores velocidades los datos no son fiables.

En el riego por aspersión se produce una distribución de gotas de distintos diámetros, las gotas de mayores diámetros vuelan más lejos y las de pequeños diámetros caen cerca del aspersor (Fig.59).

Además del viento hay otros factores que influyeron en la distribución del agua de los aspersores: el diseño del propio aspersor, el ángulo de descarga del chorro, el diámetro de las boquillas, la presión de trabajo, la altura de las boquillas sobre el suelo y la dirección del viento (Tarjuelo,2005).

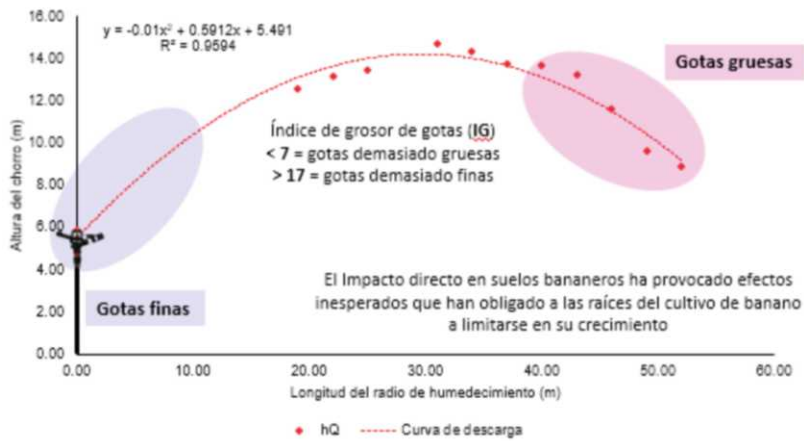


Figura 59. Curva de descarga de un sistema de riego Suprafoliar.

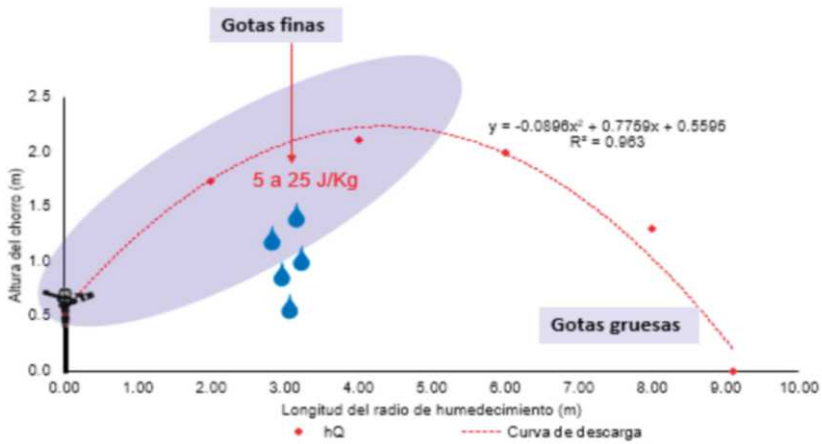


Figura 60. Curva de descarga de un sistema de riego subfoliar.

De acuerdo a las especificaciones técnicas, el radio de alcance de los aspersores en el riego suprafoliar no garantiza el traslape mínimo de un 30% del diámetro de mojado del aspersor, lo que influyó en la distribución de lámina de agua en suelo. En cambio, en el subfoliar (Fig.60) su traslape es adecuado, lo que ve reflejado en uno de los parámetros de evaluación del sistema de riego, cuyo $DU > 70\%$.

4.15.4 Índice de grosor de gotas de la descarga del aspersor

Determinados los índices de grosor de las gotas (IG) en la (Tabla 52), presenta valores de $IG = 9,59$ para el sistema de riego subfoliar que está comprendido entre 7 y 17 que se interpreta como recomendable. En cambio, para el riego suprafoliar el valor IG es 3,53,

valor menor que 7 y por tanto considerado como gotas demasiado gruesas. Por esto, se prevé que con este sistema riego se provoque la ruptura de la estructura y el sellamiento de la capa superficial que ocasiona escorrentías superficiales que arrastran las partículas más finas del suelo, principalmente el limo, por ser fácilmente dispersable.

Tabla 52. Índice de grosor de gotas.

Sistema de riego	Presión (kg.cm ⁻²)	Diámetro boquilla(mm)	Índice de grosor(IG)	Rango de IG	Interpretación
Subfoliar	1,86	3,0	9,59	7-17	Recomendable
Suprafoliar	5,33	32	3,53	< 7	Gotas demasiadas gruesas

4.16 Efecto de mejoradores físicos, químicos y biológicos en la compactación en suelos bananeros

4.16.1 Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar

En tabla 53 se analizan los datos de la densidad aparente para conocer el grado de confiabilidad de los datos y si los mismos pertenecen a una misma población. Puede apreciarse que no existen datos anómalos de la densidad. Los valores de la asimetría y curtosis permiten indicar que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal (Gaussiana), en razón de que su valores están entre 0 y 3 respectivamente.

Tabla 53. Estadística descriptiva, del efecto de los mejoradores sobre la densidad aparente en fincas con sistema de riego subfoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	1,362	0,037	2,694	1,416	1,313	0,102	1,356	1,371	1,357	0,265	1,493
Yeso agrícola	5	1,205	0,038	3,116	1,243	1,150	0,093	1,183	1,223	1,223	-0,806	-0,685
Roturación	5	1,112	0,112	10,098	1,230	0,953	0,277	1,050	1,197	1,130	-0,582	-0,972
Cobertura vegetal	5	1,390	0,059	4,229	1,461	1,310	0,151	1,363	1,430	1,383	-0,183	-0,721

m=mínimo, M=máximo, R=rango

Tabla 54. Análisis de varianza, de la densidad aparente de los suelos por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	0,261893	3	0,0872975	19,66	0,0001
B:Profundidad	0,0232806	4	0,00582015	1,31	0,3208
RESIDUOS	0,0532794	12	0,00443995		
TOTAL (CORREGIDO)	0,338453	19			

El ANOVA aplicado a los datos de densidad aparente (Tabla 54), descompone la variabilidad de la densidad aparente en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. En razón de que el factor mejorador el valor-P es menor que 0,05, este tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 55. Distribución de la densidad aparente en el perfil del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	1,31 \pm 0.10	1,15 \pm 0.03	0,95 \pm 0.05	1,38 \pm 0.10	1,20 a
20	1,42 \pm 0.11	1,18 \pm 0.02	1,05 \pm 0.04	1,46 \pm 0.08	1,28 a
30	1,37 \pm 0.09	1,24 \pm 0.03	1,13 \pm 0.01	1,43 \pm 0.09	1,29 a
40	1,36 \pm 0.07	1,22 \pm 0.01	1,20 \pm 0.01	1,36 \pm 0.10	1,28 a
50	1,36 \pm 0.06	1,22 \pm 0.02	1,23 \pm 0.01	1,31 \pm 0.08	1,28 a
Promedio	1,36 a	1,20 b	1,11 b	1,39 a	1,27
Desv.est.	0,04	0,04	0,11	0,06	0,04
CV%	2,69	3,12	10,10	4,23	3,00

De acuerdo al análisis de varianza por medio de Tukey (Tabla 55), existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos de aplicación del yeso y la roturación respecto al testigo y cobertura vegetal en el perfil del suelo. La roturación permitió obtener el valor más bajo de densidad aparente con un promedio de $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, no existiendo diferencia significativa con la aplicación de yeso agrícola ($1,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). En cambio, los tratamientos con cobertura vegetal ($1,39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y el testigo ($1,36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) poseen valores más altos e iguales entre sí, debido probablemente a que el suelo no fue disturbado física o químicamente. A su vez, la roturación logró, en el estrato 0 -10 cm, bajar la densidad a $0,95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, un valor similar al obtenido por López y González (2012). Estos autores obtuvieron densidades de $0,97 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ mediante la roturación. Los diagramas texturales no presentan niveles críticos para estos valores; en el primer estrato de suelo, además, se verifica que la mayor variabilidad de los datos se logra en este tratamiento (10,1%).

Por otra parte, el yeso agrícola presentó efectos significativos en la densidad aparente, tal como lo señala Anikwe (2016), que observa que este mejorador reduce hasta un 17% la densidad aparente del suelo a los 90 días de aplicación. En el presente ensayo, los efectos presentaron una reducción del 12,12% (Fig.61).

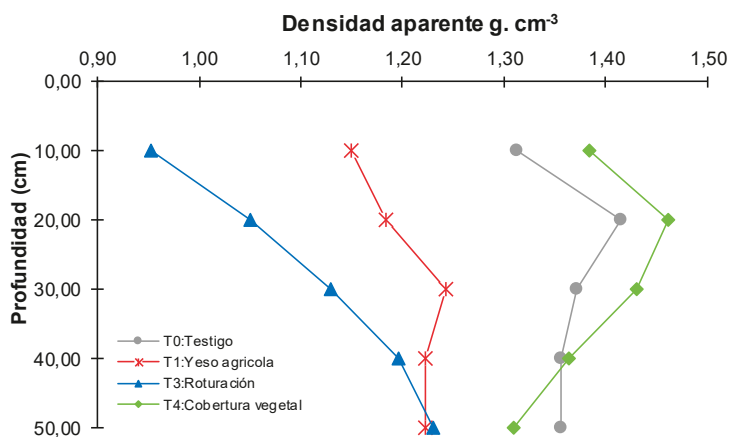


Figura 61. Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar.

4.16.2 Efecto de mejorados sobre la densidad aparente de los suelos en las fincas, con sistema de riego subfoliar

Tabla 56. Estadística descriptiva de la densidad aparente de los suelos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	1,397	0,038	2,744	1,428	1,331	0,097	1,401	1,419	1,407	-1,830	3,631
Yeso agrícola	5	1,196	0,060	5,049	1,243	1,113	0,130	1,150	1,243	1,230	-0,777	-2,120
Roturación	5	1,119	0,083	7,394	1,207	0,997	0,210	1,077	1,163	1,150	-0,801	-0,269
Cobertura vegetal	5	1,379	0,035	2,569	1,420	1,324	0,096	1,372	1,397	1,380	-0,781	1,277

m=mínimo, M=máximo, R=rango

En tabla 56, se analizan los datos de la densidad aparente, en la finca con riego suprafoliar, y no existen valores extremos que modifiquen la distribución de datos, siendo la asimetría y la curtosis lo más sensibles a su presencia. En base a los valores obtenidos de la asimetría y la curtosis, nos permite señalar que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal (Gaussiana); en razón de que sus valores están entre 0 y 3 respectivamente; sin embargo, en el testigo presenta valores de curtosis superior a 3, por lo que se considera que existen valores anómalos con este tratamiento.

Tabla 57. Análisis de varianza de la densidad aparente de los suelos, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	0,2810890	3	0,0936963	31,27	0,0001
B:Profundidad	0,0160577	4	0,00401441	1,34	0,3113
RESIDUOS	0,0359562	12	0,00299635		
TOTAL (CORREGIDO)	0,333103	19			

El ANOVA descompone la variabilidad de la densidad aparente en contribuciones debidas a varios factores (Tabla 57). Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se midió eliminando los efectos de los demás factores. En virtud que un valor-P respecto a los mejoradores, es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre variable con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 58. Distribución de la densidad aparente en el perfil del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	1,40	1,11	1,00	1,38	1,22 a
20	1,41	1,15	1,08	1,42	1,26 a
30	1,43	1,23	1,15	1,40	1,30 a
40	1,42	1,24	1,16	1,37	1,30 a
50	1,33	1,24	1,21	1,32	1,28 a
Promedio	1,40 a	1,20 b	1,12 b	1,38 a	1,27
Desv.est.	0,04	0,06	0,08	0,04	0,03
CV%	2,74	5,05	7,39	2,57	2,52

En relación al diagrama de textura/densidad de la USDA (2014), la densidad aparente determinada en estos suelos con riego suprafoliar es alta en todo perfil de suelo estudiado en los tratamientos con cobertura vegetal y testigo, $1,38$ y $1,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente (Tabla 58). La aplicación de los mejoradores permitió disminuir sus valores a un promedio de $1,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el yeso agrícola, y $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para la roturación. Estos valores son más bajos que lo obtenido por Gubiani (2013), que determinó una densidad promedio de $1,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en los primeros 45 cm de perfil de un suelo tras aplicaciones de mejoradores físico-químicos. Estadísticamente no existió diferencia significativa entre la roturación y la aplicación de yeso, y lo mismo ocurrió entre el testigo y la cobertura vegetal, valores que se justifica en razón que en estos últimos tratamientos no se produce alteración en el perfil del suelo.

El coeficiente de variabilidad más alto se dio con la aplicación de la roturación (CV=7,39%) y el yeso agrícola (CV=5,05%) por la misma acción mecánica y química que se produce en el suelo. No así en los tratamientos testigo (CV%=2,74) y cobertura vegetal (CV%=2,57), los cuales no presentaron mayor variación.

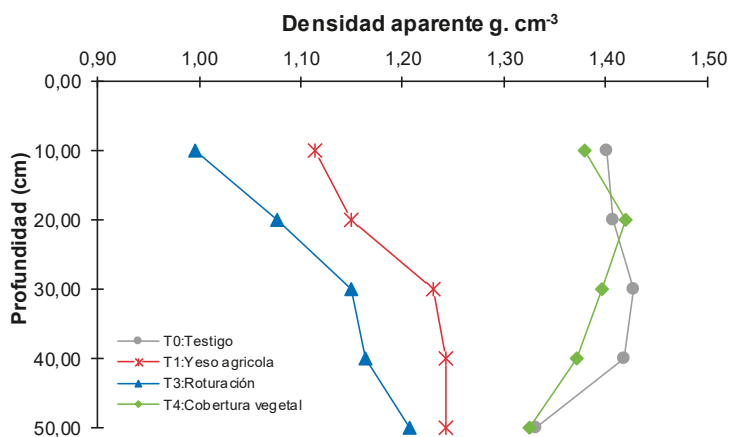


Figura 62. Dinámica de la densidad aparente en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego suprafoliar.

En figura 62, las curvas detallan el efecto de los mejoradores, y evidencia el efecto de la roturación y aplicación de yeso respecto al testigo y la cobertura vegetal. A partir de los 40 cm, hay una tendencia casi igual porque la roturación se efectuó hasta 25 cm de profundidad. La acción del yeso se evidencia mejor en los primeros 30 cm de profundidad y estadísticamente separó los dos grupos a y b.

4.16.3 Efecto de los mejoradores en la densidad real del suelo en fincas con sistema de riego subfoliar

Tabla 59. Estadística descriptiva de la densidad real de los suelos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	2,282	0,055	2,428	2,360	2,230	0,130	2,250	2,320	2,250	0,792	-1,566
Yeso agrícola	5	2,483	0,060	2,431	2,540	2,393	0,147	2,457	2,533	2,490	-0,781	-0,312
Roturación	5	2,558	0,031	1,221	2,593	2,527	0,067	2,540	2,590	2,540	0,471	-3,034
Cobertura vegetal	5	2,488	0,087	3,485	2,600	2,360	0,240	2,480	2,520	2,480	-0,422	1,435

m=mínimo, M=máximo, R=rango

En tabla 59 se analizan los datos de la densidad real para conocer la medida de posición y si los mismos pertenecen a una misma población. En base a los resultados, se puede señalar si existen datos anómalos que modifican sensiblemente la tendencia de una

distribución normal de los datos, siendo la asimetría y la curtosis los parámetros más sensibles a su presencia. Hay un valor de curtosis de -3,17, superior al valor de 3. Para que la distribución de frecuencia se acerque a una distribución normal, se deberían mantener valores de 0 y 3 para la simetría y curtosis.

Tabla 60. Análisis de varianza, de los contenidos de la densidad real del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	0,211655	3	0,0705517	16,59	0,0001
B:Profundidad	0,0095	4	0,002375	0,56	0,697
RESIDUOS	0,05102	12	0,00425167		
TOTAL (CORREGIDO)	0,272175	19			

En la tabla 60, el ANOVA descompone la variabilidad de densidad real en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Dr con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 61. Distribución de la densidad real en el perfil del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	2,23±0.29	2,53±0.06	2,54±0.07	2,48±0.09	2,45 a
20	2,32±0.08	2,54±0.01	2,54±0.05	2,52±0.27	2,48 a
30	2,36±0.22	2,39±0.02	2,53±0.05	2,48±0.13	2,44 a
40	2,25±0.15	2,49±0.00	2,59±0.00	2,36±0.25	2,42 a
50	2,25±0.13	2,46±0.08	2,59±0.02	2,60±0.31	2,48 a
Promedio	2,28 a	2,48 b	2,56 b	2,49 b	2,45
Desv.est.	0,06	0,06	0,03	0,09	0,02
CV%	2,43	2,43	1,22	3,49	0,99

Los valores más altos de la densidad real (Tabla 61) se obtienen con el tratamiento de la roturación, debido probablemente al arreglo de las partículas del suelo, mostrando diferencia significativa frente al testigo. También se observa que, entre tratamiento con yeso agrícola, roturación y cobertura vegetal no hay diferencia significativa. El análisis de la dispersión de los datos presenta una desviación estándar baja, al igual que su coeficiente de variación. Sus valores son inferiores a $2,5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, características de los suelos con

contenido de materia orgánica inferior a 1% y a la misma composición textural de estos suelos de origen aluvial (Fig. 63).

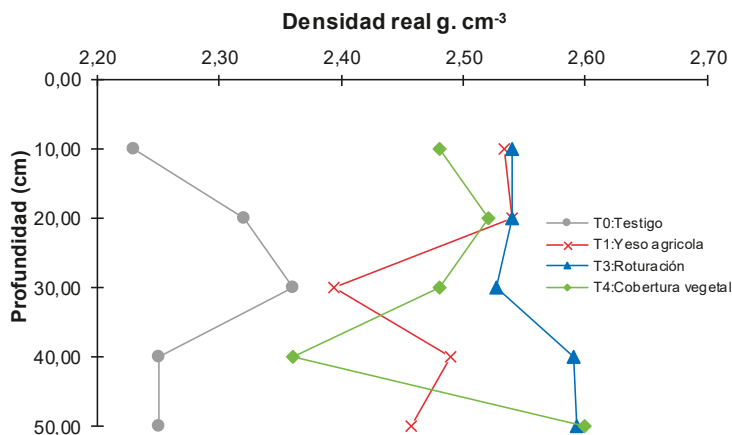


Figura 63. Dinámica de la densidad real en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

4.16.4 Efecto de los mejoradores en la densidad real del suelo, en fincas con sistema de riego suprafoliar

Tabla 62. Estadística descriptiva de la densidad real de los suelos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	2,286	0,080	3,508	2,360	2,190	0,170	2,210	2,350	2,320	-0,499	-2,969
Yeso agrícola	5	2,564	0,067	2,602	2,620	2,490	0,130	2,493	2,620	2,597	-0,522	-3,224
Roturación	5	2,593	0,046	1,781	2,620	2,513	0,107	2,593	2,620	2,620	-1,925	3,667
Cobertura vegetal	5	2,412	0,075	3,094	2,500	2,320	0,180	2,350	2,450	2,440	-0,259	-1,993

m=mínimo, M=máximo, R=rango

En tabla 62 se analizan los datos de la densidad real en sistema de riego suprafoliar. La medida de posición nos permite señalar que existen datos anómalos de curtosis (3,6). Estos valores extremos modifican sensiblemente la distribución de los datos, siendo la asimetría y la curtosis lo más sensibles a su presencia, observándose que la curtosis presenta valores anómalos y por lo tanto no existe una distribución de frecuencia que se acerca a una distribución normal (gaussiana), porque sus valores están fuera del rango de 0 y 3. Esto se atribuyó a errores en la determinación de esta propiedad o a la variabilidad edafo-química del suelo.

Tabla 63. Análisis de varianza de los valores de la densidad real del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	0,303855	3	0,1012850	41,1	0,0001
B:Profundidad	0,04603	4	0,0115075	4,67	0,0167
RESIDUOS	0,02957	12	0,00246417		
TOTAL (CORREGIDO)	0,379455	19			

La tabla 63, el ANOVA descompone la variabilidad de la densidad real en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que dos valores-P es menor que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Variable con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 64. Distribución de la densidad real en el perfil del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	2.19±0.15	2.49±0.03	2.51±0.03	2.32±0.21	2.38 a
20	2.36±0.16	2.49±0.00	2.59±0.03	2.35±0.22	2.45 ab
30	2.21±0.14	2.60±0.01	2.62±0.00	2.50±0.32	2.48 ab
40	2.32±0.14	2.62±0.00	2.62±0.00	2.44±0.25	2.50 b
50	2.35±0.29	2.62±0.00	2.62±0.00	2.45±0.09	2.51 b
Promedio	2.29 a	2.56 c	2.59 c	2.41 b	2.46
Desv.est.	0.08	0.07	0.05	0.07	0.05
CV%	3.51	2.60	1.78	3.09	2.14

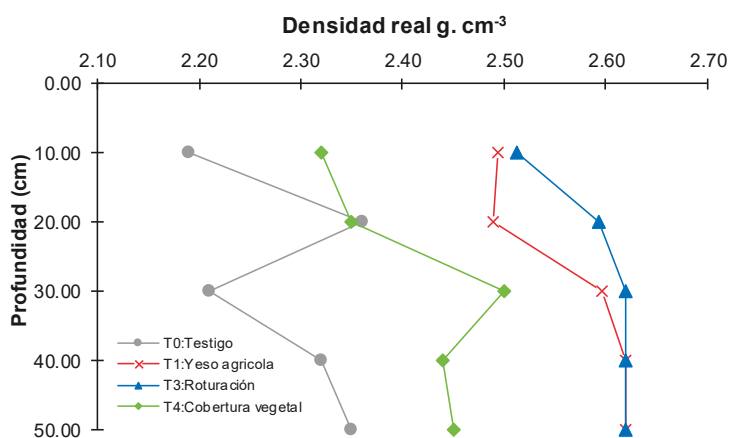


Figura 64. Dinámica de la densidad real en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

En Tabla 64 y Fig. 64 el valor más alto de la densidad real en los diversos tratamientos en fincas con sistema de riego suprafoliar lo logró la roturación (2,59 g.cm⁻³), y el más bajo fue observado en el testigo (2,29 g.cm⁻³). No existe diferencia significativa entre aplicación de yeso y roturación, pero sí entre estos, el testigo, y la cobertura vegetal. Lo que puede suponerse la acción del riego suprafoliar en la degradación de la estructura, en los primeros 10 cm y como lo analizara Ceddia et al., (2009), no encontraron cambios en los valores medios de la densidad real, solo encontraron ajustes esféricos en el primer estrato, por otra parte (Henaó 2010) y (Orjuela- Malta et al., 2011), señalan que estos valores de densidad real están ligado con el tipo y cantidad de constituyente minerales y orgánicos y la velocidad de cimentación de partículas en medios líquidos, producto del origen aluvial de estos suelos.

4.16.5 Efecto de los mejoradores en el porcentaje de materia orgánica del suelo en fincas con sistema de riego subfoliar

En tabla 65 se analizan los datos del porcentaje de materia orgánica para conocer la medida de posición dada a través de la media, asimetría y curtosis de los datos y la dispersión a través de la desviación estándar y su coeficiente de variación, siendo este último, muy alto en todos los tratamientos. Sin embargo, todos pertenecen a una misma población, no existen datos anómalos que modifiquen sensiblemente la distribución de los datos.

Tabla 65. Estadística descriptiva del contenido de materia orgánica (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	0,824	1,091	132,344	2,413	0,000	2,413	0,000	1,513	0,193	0,955	-1,206
Yeso agrícola	5	0,853	1,094	128,306	2,273	0,000	2,273	0,000	1,793	0,197	0,693	-2,678
Roturación	5	1,325	1,029	77,612	2,813	0,000	2,813	0,877	1,567	1,370	0,341	0,968
Cobertura vegetal	5	1,406	1,055	75,008	2,657	0,000	2,657	0,843	2,173	1,357	-0,195	-1,127

m=mínimo, M=máximo, R=rango

La tabla 66, el ANOVA descompone la variable materia orgánica en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, tienen un efecto estadísticamente significativo

sobre Materia orgánica con un 95,0% de nivel de confianza. La distribución de la densidad real en el perfil del suelo, en un sistema de riego presurizado suprafoliar, con la utilización de mejoradores de propiedades físicas.

Tabla 66. Análisis de varianza de la distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	1,41745	3	0,472485	4,99	0,0179
B:Profundidad	17,0532	4	4,2633	45,01	0,0001
RESIDUOS	1,13662	12	0,0947183		
TOTAL (CORREGIDO)	19,6073	19			

Con la roturación, se obtuvo el valor más alto de MO en el primer estrato (2.81%, tabla 67) comparado con lo obtenido por Mon (2007) en el cual la aplicación de los mejoradores elevó los niveles de materia orgánica en los primeros 20 cm de suelo con 2,86% en yeso agrícola. En cambio, con cobertura vegetal el contenido es 2,66 %, considerado como alto. La roturación presentó mayores contenidos de materia orgánica en los primeros 40 cm de suelo debido a la incorporación de residuos orgánicos al momento de la remoción, a diferencia del testigo y el yeso que a partir de los 30 cm presentan un nulo contenido de materia orgánica.

Tabla 67. Distribución del contenido de materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	2,41±0,02	2,27±0,14	2,81±0,04	2,66±0,02	2,54 d
20	1,51±0,02	1,79±0,13	1,57±0,08	2,17±0,28	1,76 c
30	0,19±0,02	0,20±0,07	1,37±0,03	1,36±0,34	0,78 b
40	0,00±0,00	0,00±0,00	0,88±0,04	0,84±0,17	0,43 ab
50	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00 a
Promedio	0,82 a	0,85 ab	1,33 ab	1,41 b	1,10
Desv.est.	1,09	1,09	1,03	1,05	1,03
CV%	132,34	128,31	77,61	75,01	93,77

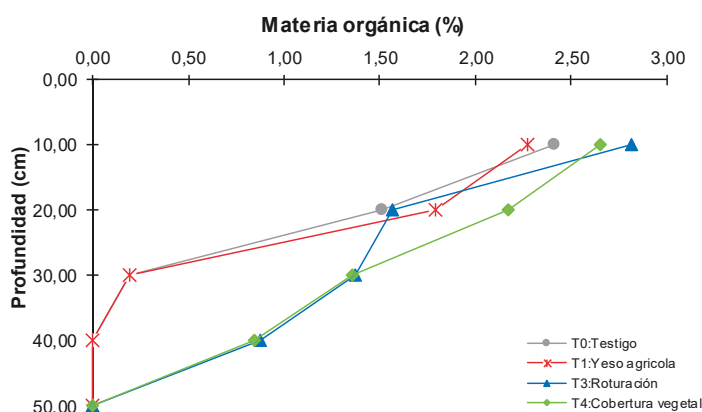


Figura 65. Dinámica del contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

En el caso del tratamiento con cobertura vegetal, en promedio obtuvo el valor más alto de 1,41% considerado como bajo, sin embargo existe un aporte significativo de materia orgánica producto de la hojarasca y el mismo sistema radicular que al cumplir su ciclo fisiológico algunas se necrosan y dan aportes orgánicos, (Fig.65).

4.16.6 Efecto de los mejoradores en porcentaje de materia orgánica del suelo en fincas (%) con sistema de riego suprafoliar

En tabla 68, se analizan los datos de la materia orgánica para establecer si los mismos pertenecen a una misma población o establecer si en el conjuntos existen datos anómalos, en razón de que estos valores extremos modifican sensiblemente la distribución de los datos, siendo la asimetría y la curtosis lo más sensibles a su presencia y que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal(Gaussiana), porque los datos están entre 0 y 3 respectivamente, se admite de modo practico que una distribución de frecuencia está

cerca de la normalidad cuando el coeficiente de asimetría es menos de 1 (Paz- González et al., 1996).

Tabla 68. Estadística descriptiva, de los contenidos de materia orgánica, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar.

Tratamientos	n	□	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	0,519	0,858	165,167	1,977	0,000	1,977	0,000	0,620	0,000	1,767	2,919
Yeso agrícola	5	0,567	0,877	154,687	1,993	0,000	1,993	0,000	0,840	0,000	1,471	1,438
Roturación	5	0,945	1,159	122,684	2,670	0,000	2,670	0,000	1,573	0,480	0,963	-0,616
Cobertura vegetal	5	1,149	1,145	99,604	2,603	0,000	2,603	0,220	2,073	0,850	0,421	-2,398

La tabla 69, el ANOVA descompone la variable materia orgánica en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se midió eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Materia orgánica con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 69. Análisis de varianza, de los contenidos de materia orgánica por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	1,37438	3	0,458125	5,88	0,0104
B:Profundidad	15,6766	4	3,919150	50,3	0,0001
RESIDUOS	0,93490	12	0,0779083		
TOTAL (CORREGIDO)	17,9859	19			

Tabla 70. Distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	1,98±0,42	1,99±0,05	2,67±0,09	2,60±0,25	2,31 c
20	0,62±0,21	0,84±0,01	1,57±0,07	2,07±0,17	1,28 b
30	0,00±0,00	0,00±0,00	0,48±0,01	0,85±0,03	0,33 a
40	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,22±0,17	0,06 a
50	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00 a
Promedio	0,52 a	0,57 a	0,94 ab	1,15 b	0,80
Desv.est.	0,86	0,88	1,16	1,14	0,99
CV%	165,17	154,69	122,68	99,60	124,57

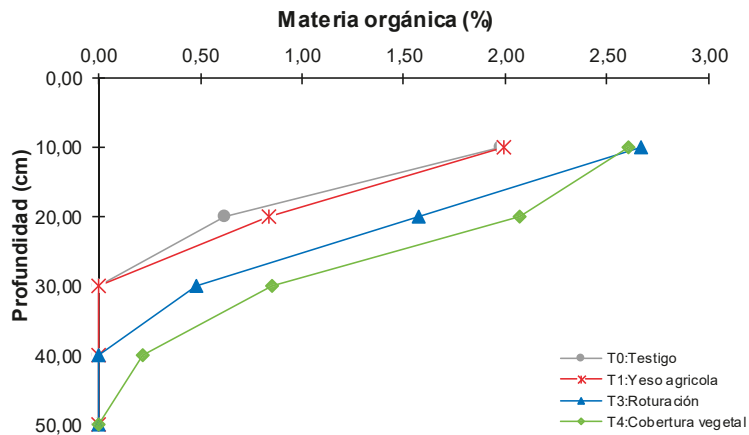


Figura 66. Dinámica del contenido de la materia orgánica en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego suprafoliar.

En Tabla 70 y Fig. 66 se presenta los contenidos de materia orgánica evidenciándose que en el primer estrato sus contenidos va 1,98% en el testigo a 2,67% con la roturación considerados como normales, con la roturación se logra incorporar en estratos más profundos materia orgánica, no hubo diferencia significativa entre tratamientos testigo, aplicación de yeso y roturación, pero si entre el tratamiento con cobertura vegetal, el testigo y yeso agrícola, lo que pone de manifiesto que la intensidad pluviométrica que produce los sistemas de riego suprafoliar, más las altas temperaturas, provocan una rápida descomposición de la materia orgánica y sus contenidos en promedios son de bajo a muy bajo y en el estrato final su contenido es cero.

4.16.7 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo, en fincas con sistema de riego subfoliar

En tabla 71, se analizan los datos de la porosidad, y se deduce que en los conjuntos de datos obtenidos no hay valores extremos que modifiquen sensiblemente la distribución de los datos. La asimetría y la curtosis indican que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal (gaussiana), debido que tienen valores de 0 y 3 respectivamente.

Tabla 71. Estadística descriptiva de la porosidad total del suelo (%), por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego subfoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	39,877	1,013	2,539	41,343	38,730	2,614	39,375	40,396	39,542	0,649	-0,262
Yeso agrícola	5	51,418	2,604	5,064	54,577	48,050	6,527	50,182	53,411	50,870	-0,019	-1,299
Roturación	5	56,540	3,997	7,070	62,414	52,571	9,843	53,797	58,661	55,259	0,827	-0,570
Cobertura vegetal	5	43,727	3,247	7,426	49,180	41,497	7,683	41,606	44,260	42,090	1,672	2,534

m=mínimo, M=máximo, R=rango

La tabla 72 el ANOVA, descompone la variable porosidad, en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que el valor-P, respecto a mejoradores, es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre variable con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 72. Análisis de varianza, de la porosidad total en el suelo, por efecto de los mejoradores en fincas con sistema de riego subfoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	844,079	3	281,36	34,77	0,0001
B:Profundidad	40,1311	4	10,0328	1,24	0,3457
RESIDUOS	97,1102	12	8,09252		
TOTAL (CORREGIDO)	981,32	19			

De manera directa los contenidos de MO influyen en los porcentajes de porosidad, la roturación y la aplicación de yeso lograron los más altos porcentajes de porosidad (Tabla 73), logrando en el primer estrato con roturación hasta 62,41% seguido del tratamiento con sulfato de calcio, cuya función del calcio es la formar agregados, mejorando la porosidad de los suelos. Según la FAO para suelos francos arenosos su porosidad va del 35 a 50% y como en las primeras capas el contenido de arcilla es mayor, según Archet y Smith (1972) la porosidad puede variar de 40-60%.

Tabla 73. Distribución de la porosidad total en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	40,40±8,13	54,58±2,04	62,41±3,04	44,26±4,03	50,41 a
20	38,73±6,00	53,41±0,74	58,66±1,36	41,50±6,25	48,07 a
30	41,34±7,36	48,05±0,99	55,26±1,31	42,09±5,01	46,69 a
40	39,37±5,39	50,87±0,23	53,80±0,45	41,61±7,56	46,41 a
50	39,54±2,97	50,18±1,13	52,57±0,12	49,18±5,46	47,87 a
Promedio	39,88 a	51,42 b	56,54 b	43,73 a	47,89
Desv.est.	1,01	2,60	4,00	3,25	1,58
CV%	2,54	5,06	7,07	7,43	3,31

En el tratamiento con la roturación y yeso agrícola no existe diferencia significativa entre ellos, pero si existe diferencia entre estos tratamiento y testigo y el de cobertura vegetal (Fig.67) logrando promedios de 56,54% , 51,42%, 39,88 % y 43,73% respectivamente en todo el perfil de suelo analizado en relación a lo obtenido por Dragui y Cerisola (2014), en la que un suelo descompactado presentó porosidad significativa utilizando subsoladores de 0,25 m de profundidad en los primeros 30 cm del perfil.

Por otro lado, la roturación presento un porcentaje de porosidad de 62,41 % en los primeros 10 cm al igual que López y González (2012) que también obtuvieron un 63,3 % de porosidad en los primeros estratos de suelo y que a su vez Shainberg (1989) deduce que el yeso agrícola con el pasar del tiempo se deposita en la capas inferiores del suelo alterando su estructura y mejorando la porosidad.

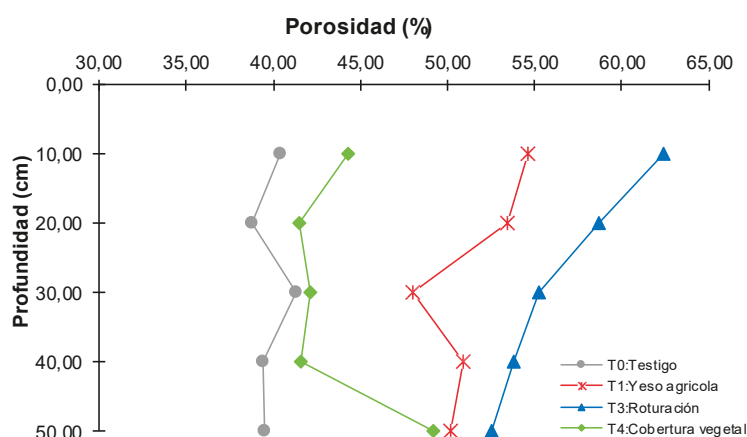


Figura 67. Dinámica de la Porosidad total en el perfil del suelo (%), por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego subfoliar.

4.16.8 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo (%), en fincas con sistema de riego suprafoliar

En tabla 74, se analizan los datos de la porosidad para conocer si pertenecen a una misma población además nos demuestran que no existen datos anómalos, que modifican sensiblemente la distribución de los datos, siendo la asimetría y la curtosis lo más sensibles a su presencia. Los datos nos permiten señalar que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución normal, porque sus valores están entre 0 y 3 respectivamente, se admite

de modo práctico que una distribución de frecuencia está cerca de la normalidad cuando el coeficiente de asimetría es menos de 1 (Paz- González et al., 1996).

Tabla 74. Estadística descriptiva de la porosidad total del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar

Tratamientos	n	x	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	38,480	3,307	8,594	42,931	35,101	7,830	35,445	40,290	38,632	0,318	-1,535
Yeso agrícola	5	53,377	1,227	2,298	55,349	52,545	2,804	52,545	53,815	52,632	1,395	1,059
Roturación	5	56,895	2,522	4,434	60,350	53,944	6,406	55,598	58,476	56,107	0,437	-0,966
Cobertura vegetal	5	42,272	2,643	6,252	45,785	39,142	6,643	40,186	43,167	43,080	0,109	-1,129

m=mínimo, M=máximo,

La tabla 75 el ANOVA descompone la variabilidad de porosidad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que el de valor-P del mejorador, es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Variable con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 75. Análisis de varianza de la porosidad total del suelo, por efecto de los mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	1156,4	3	385,466	49,1	0,0001
B:Profundidad	8,99137	4	2,24784	0,29	0,8812
RESIDUOS	94,2078	12	7,85065		
TOTAL (CORREGIDO)	1259,6	19			

En Tabla 76, los mejoradores obtuvieron menores efectos sobre esta propiedad en los suelos con riego suprafoliar presentando a su vez bajos contenidos de materia orgánica en promedio, respecto al otro sistema de riego, la roturación y el yeso agrícola permitieron obtener valores de 56,90% y 53,38% respectivamente, son estadísticamente iguales pero diferentes a los tratamientos testigo y cobertura vegetal presentaron valores de 38,48% y 42,27% respectivamente e iguales (Fig.68).

Tabla 76. Distribución de la porosidad total en el perfil del suelo (%) utilizando mejoradores, en finca con sistema de riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T2:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	35,44±9,86	55,35±0,17	60,35±1,84	40,19±6,04	47,83 a
20	40,29±6,50	53,82±1,84	58,48±1,27	39,14±6,49	47,93 a
30	35,10±8,11	52,63±0,23	56,11±0,38	43,08±9,61	46,73 a
40	38,63±8,22	52,54±0,22	55,60±0,96	43,17±7,27	47,49 a
50	42,93±5,88	52,54±0,79	53,94±1,10	45,78±3,74	48,80 a
Promedio	38,48 a	53,38 b	56,90 b	42,27 a	47,76
Desv.est.	3,31	1,23	2,52	2,64	0,75
CV%	8,59	2,30	4,43	6,25	1,57

Los efectos de la roturación al igual que en el sistema de riego subfoliar permitieron obtener los valores más altos con un 60.35% de porosidad después de la roturación en los primeros 10 cm de profundidad, de igual manera que López y González (2012) obtuvo una porosidad de 63.3 % en los primeros 10 cm de suelo, disminuyendo conforme aumenta la profundidad de suelo debido a un mayor porcentaje de arena en las capas inferiores del perfil, por su parte la aplicación del yeso agrícola mejoró la estructura del suelo presentando niveles más altos que el testigo y la cobertura vegetal. La acción del yeso no fue tan eficiente debido al lavado del producto por la alta intensidad pluviométrica del sistema.

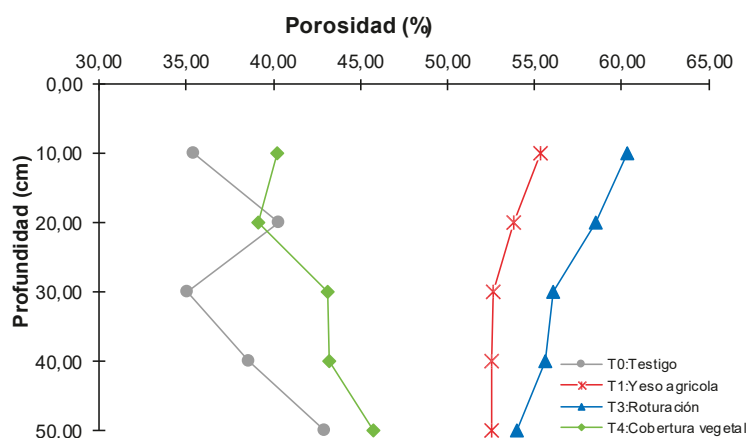


Figura 68. Efecto de los mejoradores en la Resistencia del suelo, en fincas con sistema de riego subfoliar.

4.16.9 Efecto de los mejoradores en la porosidad total del suelo (%), en fincas con sistema de riego suprafoliar

En tabla 77, se analizan los datos de la resistencia a la penetración en el suelo y determinar si pertenecen a una misma población, en este caso del conjuntos de datos obtenidos no existen valores anómalos, que modifiquen sensiblemente la distribución de los datos, siendo. En razón de los valores de simetría y curtosis, se deduce que los mismos se acercan a una distribución de frecuencia normal porque sus valores están comprendidos entre 0 y 3 respectivamente. Además, sus promedios determinan que los valores más bajos de resistencia en promedio, se lo obtiene con la roturación, seguido de la aplicación del sulfato de calcio con valores de 505,893 y 553,687 Kpa respectivamente.

Tabla 77. Estadística descriptiva, de la resistencia a la penetración del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Tratamientos	n	x	S	Cv%	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	811,294	88,224	10,874	923,878	678,711	245,167	797,444	835,833	820,603	-0,540	1,699
Yeso agrícola	5	553,687	101,863	18,397	693,202	420,224	272,978	514,763	603,080	537,163	0,156	0,179
Roturación	5	505,893	286,922	56,716	845,369	131,613	713,756	393,802	738,424	420,258	-0,049	-1,353
Cobertura vegetal	5	788,833	147,451	18,692	975,748	622,000	353,748	668,000	886,752	791,667	0,138	-1,917

m=mínimo, M=máximo, R=rango

La tabla 78, el ANOVA descompone a esta variable, en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Puesto que el valor de $-P$ del mejorador, es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Variable, con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 78. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración del suelo, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Mejorador	372214	3	124071	5,08	0,0169
B:Profundidad	195934	4	48983,4	2,01	0,1576
RESIDUOS	292973	12	24414,4		
TOTAL (CORREGIDO)	861121	19			

Los valores de la resistencia (Tabla 79) en los diversos tratamientos, no muestran diferencia significativa entre sus valores, pero es evidente que con la roturación se logra

bajarla a 131,61 Kpa en el estrato de 0- 10 cm (Fig. 69), algo similar ocurre con el tratamiento de yeso que su valor disminuye a 420,22 Kpa.

En la misma tabla se observa que la mayor resistencia a la compactación se presenta en todos los tratamientos en el estrato de 10- 20 cm, donde la sensibilidad de las raíces no logran penetrar produciéndose su asfixia y posterior muerte, lo que provoca que las plantas de banano se volquen y su sistema radicular se extienda horizontalmente, casi a la superficie del suelo coincidiendo además, que los fragmento de las raíces adheridas al corno del pseudo tallo en promedio tengan una longitud de alrededor de 10 cm, todo esto concuerda con lo señalado por Horn y Smucker (2005), el aumento de la resistencia a la penetración está en relación directa con el aumento de la densidad y disminución del contenido de humedad y que ello determina un aumento de la cohesión de las partículas del suelo.

Tabla 79. Distribución de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T1:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	797,44±353,02	420,22±9,84	131,61±10,92	791,67±96,21	535,24 a
20	923,88±248,30	693,20±7,35	393,80±7,57	975,75±98,69	746,66 a
30	835,83±322,03	603,08±11,73	845,37±122,54	886,75±167,95	792,76 a
40	820,60±395,36	537,16±75,77	738,42±103,95	622,00±166,17	679,55 a
50	678,71±266,51	514,76±41,66	420,26±15,40	668,00±195,25	570,43 a
Promedio	811,29 b	553,69 ab	505,89 a	788,83 ab	664,93 A
Desvest	88,22	101,86	286,92	147,45	110,66
CV%	10,87	18,40	56,72	18,69	16,64

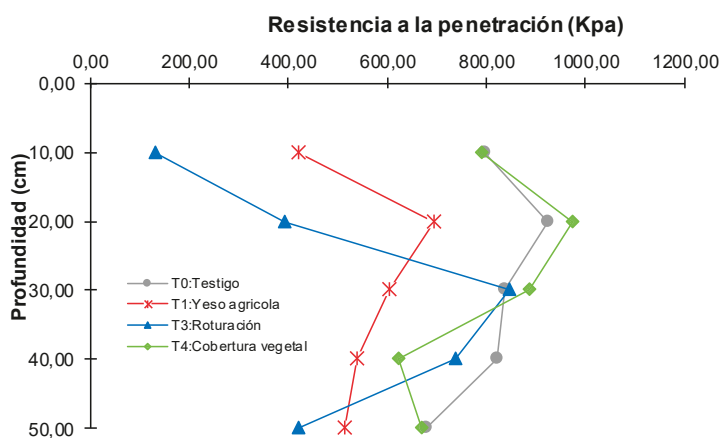


Figura 69. Dinámica de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego subfoliar.

En figura 70, se muestra la acción dinámica del sulfato de calcio en los primeros 90 días de aplicación, sobre la resistencia a la penetración, en el perfil del suelo analizado, registrándose al inicio en los primeros 10 cms. una RPS de 1114,7Kpa, a 30 días 926,51Kpa; a 45 días 801,93Kpa; a 60 días 675,08Kpa; a 75 días 581,87 Kpa y a los 90 días 420,22Kpa. por las propiedades química del calcio de aglutinar las partículas del suelo.

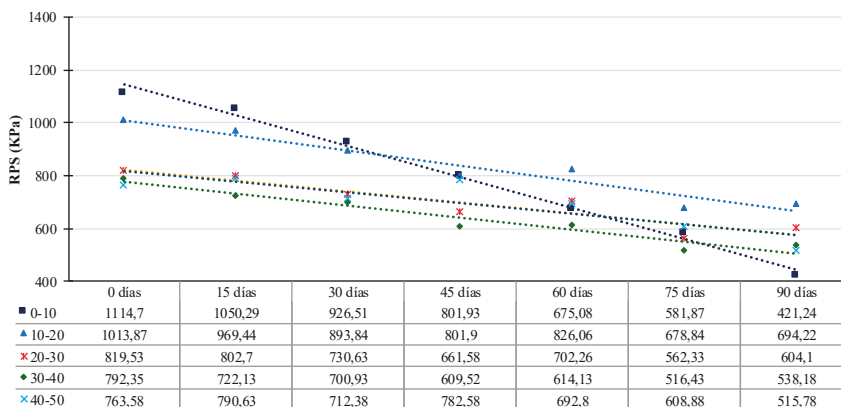


Figura 70. Dinámica de la resistencia a la penetración (KPa) a los 90 días de la aplicación del yeso agrícola, por estrato, en sistema de riego subfoliar.

4.16.10 Efecto de los mejoradores en la Resistencia del suelo, en fincas con sistema de riego suprafoliar

En tabla 80, se analizan los datos de la resistencia a la penetración del suelo y señalamos que en el conjunto de datos no existen valores extremos y que todos pertenecen a una misma población, siendo la asimetría y la curtosis lo más sensibles a su presencia. En base a los datos de la asimetría y la curtosis nos permite conocer que la distribución de frecuencia se acerca a una distribución, en virtud que sus valores están entre 0 y 3 respectivamente.

Tabla 80. Estadística descriptiva, de la resistencia de la penetración, por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Tratamientos	n	□	S	Cv	M	m	R	Q1	Q3	Mediana	Asimetría	Curtosis
Testigo	5	856,78	148,24	17,30	992,21	608,62	383,59	858,10	942,23	882,73	-1,55	2,83
Yeso agrícola	5	895,94	267,56	29,86	1135,77	449,75	686,02	863,02	1019,79	1011,38	-1,56	2,58
Roturación	5	678,05	399,64	58,94	1064,76	156,76	907,99	404,66	1054,66	709,39	-0,33	-2,03
Cobertura vegetal	5	832,24	174,02	20,91	1085,89	666,89	419,00	700,55	928,67	779,22	0,81	-0,80

m = mínimo, M = máximo, R =rango

El valor más bajo en promedio lo determina la roturación con 678,05 Kpa. Lo que es evidente que estos suelos con sistema de riego suprafoliar presentan valores de resistencia mayores que con sistema subfoliar, debido probablemente al impacto de la energía de las gotas de agua con que llegan a la superficie del suelo, lo que provoca el deterioro de la estructura del suelo, disgregando sus partículas las misma que algunas erosionan y son trasladadas por la escorrentía superficial y otras por eluviación entran en el perfil del suelo o puede ser por su geomorfología de los mismos.

Tabla 81. Distribución de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), por efecto de los mejoradores, en fincas con sistema de riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	Mejoradores				Promedio
	T0:Testigo	T1:Yeso agrícola	T3:Roturación	T4:Cobertura vegetal	
10	608,62±267,07	450,75±47,79	156,76±24,93	779,22±265,78	498,59 a
20	882,73±229,04	863,02±36,43	404,66±51,07	1085,89±143,76	809,07 a
30	942,23±322,22	1011,38±236,86	709,39±40,55	928,67±132,78	897,92 a
40	858,10±278,01	1019,79±118,98	1054,66±68,49	700,55±104,81	908,28 a
50	992,21±243,90	1135,77±109,48	1064,76±48,48	666,89±143,67	964,91 a
Promedio	856,78 a	895,94 a	678,05 a	832,24 a	815,75 B
Desvest	148,24	267,56	399,64	174,02	185,87
CV%	17,30	29,86	58,94	20,91	22,79

En Tabla 81, los valores de la resistencia a la penetración en todos los tratamientos en sistema de riego suprafoliar no existe diferencia significativa entre ellos, sin embargo con la aplicación del yeso al igual que la roturación es evidente su efecto en el perfil, de valores más bajos en los primeros estratos y va aumentando hasta llegar a los 50 cm. En cambio, en el testigo y el de cobertura vegetal, que no hubo alteración física en el perfil, su mayor resistencia se presenta en los estratos 20- 30 cm y 10- 20 cm respectivamente.

En el perfil del suelo, no existen diferencias significativas al igual que entre tratamientos. Las altas intensidades pluviométricas que produce este sistema, disperso al sulfato de calcio, permitiendo el ingreso al suelo de una parte del mismo, a pesar de ello se nota que en los primeros estratos la resistencia muestra valores bajo de 450,75 Kpa y en los estratos inferiores a partir del estrato de 20- 30 cm estos valores aumentan a 1011,38 Kpa. En cambio, en el tratamiento con cobertura su mayor valor se registra en el estrato de 10-20 cm con 1085,89 Kpa. En el tratamiento con roturación le logró bajar la resistencia en el primer estrato a 156,76 Kpa, notándose su efecto hasta una profundidad de la roturación de 25 cm. (Fig. 71)

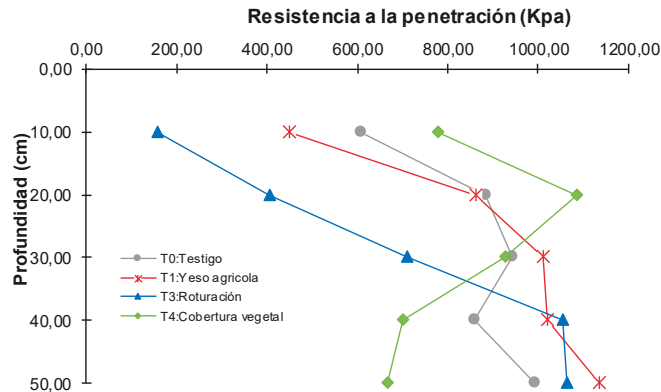


Figura 71. Dinámica de la resistencia a la penetración en el perfil del suelo (Kpa), utilizando mejoradores en finca con un sistema de riego suprafoliar.

Cuando los valores de RPS presentan valores superiores a 800 Kpa, las raíces presentan dificultad para atravesar la capa compactada, desarrollándose superficialmente, restringiéndose la absorción de nutrientes y el contenido volumétrico del agua en el perfil (Taylor et al., 1966)

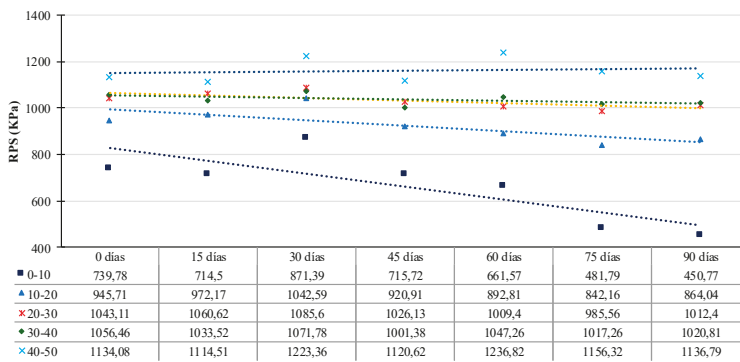
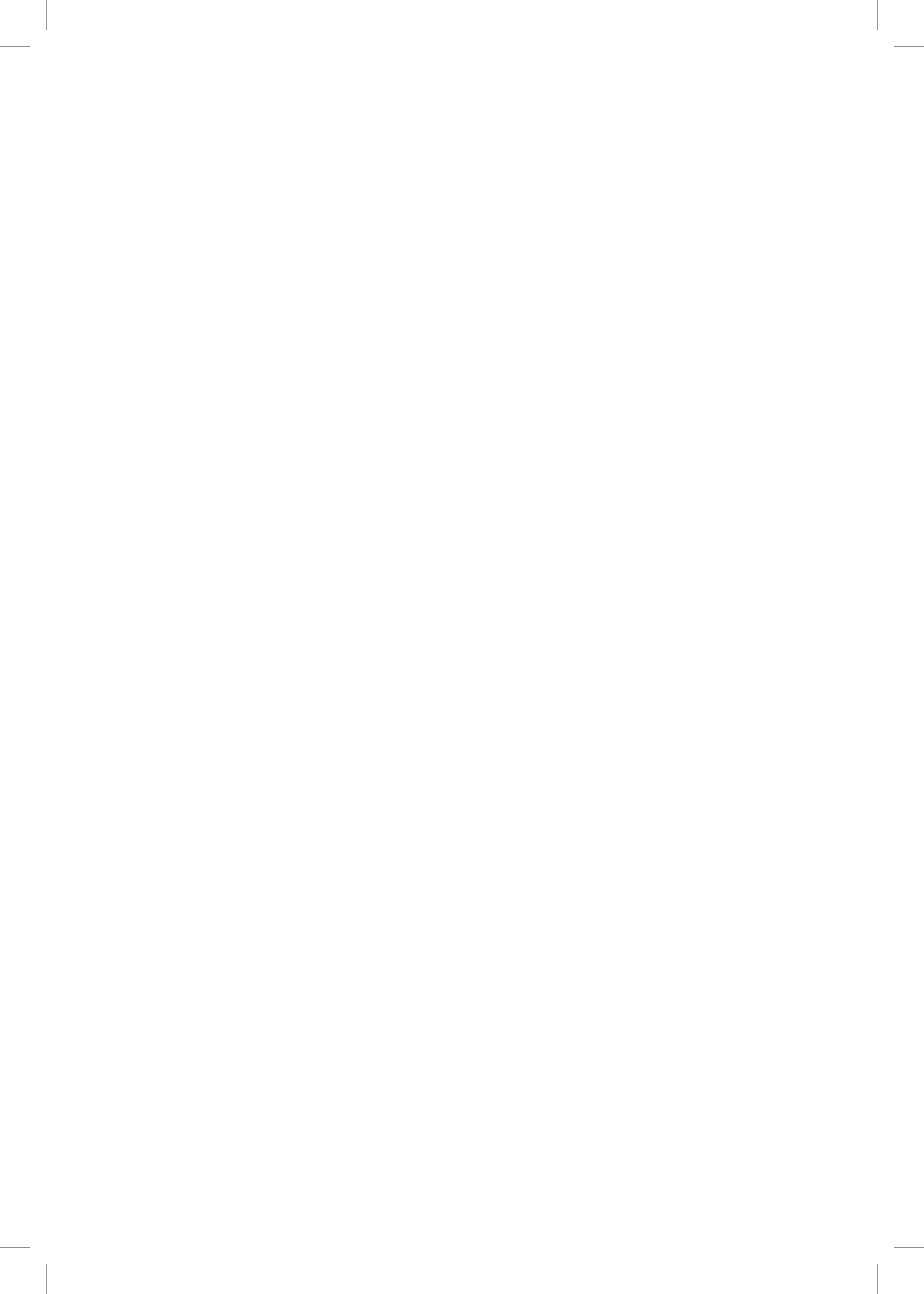


Figura 72. Dinámica de la resistencia a la penetración (Kpa) a los 90 días de la aplicación del yeso agrícola, por estrato, en sistema de riego suprafoliar.

En figura 72, se evidencia el efecto del sulfato de calcio en la resistencia a la penetración, a lo largo de los primeros 90 días de su aplicación, en finca con sistema de riego suprafoliar, donde su acción es menor que el subfoliar, debido a la intensidad pluviométrica de los aspersores, que ocasionaban un lavado del mismo. Sin embargo, antes de su aplicación, tenía una resistencia de 738,78 Kpa en los primeros 10 cm., a los 15 días bajo a 714,5 Kpa para finalmente a los 90 días llegar a registrar un valor de 481,79Kpa, por lo que la acción del calcio en la descompactación del suelo es menos evidente que la roturación.



5. CONCLUSIONES

En base a los objetivos planteados se llegó a las siguientes conclusiones:

A) Elaborar la curva de retención de humedad (CRH) para conocer la capacidad de retención del agua en el suelo sometido a diversas tensiones.

-El mayor porcentaje de humedad del suelo fue de 28,75; 26,17 y 25,70% en el estrato de 0–10 cm, y los sistemas de riego subfoliar sin cobertura vegetal, suprafoliar con cobertura y sin cobertura vegetal, respectivamente.

-El punto de inflexión de la ecuación polinomial ajustada a los datos experimentales determinó contenido de humedad de 23,0 a 26,19% de la finca El Carmen y la Fátima respectivamente, señala además como límite entre la zona de saturación y desaturación residual.

- En el análisis de las propiedades físicas, se determinó que existe una correlación negativa entre la densidad aparente y los porcentajes de humedad, y de aireación; además de una correlación positiva entre la densidad real y el porcentaje de porosidad total del suelo, y de una correlación positiva entre el porcentaje de humedad del suelo y el porcentaje total de aireación.

-Existió diferencia significativa del contenido de materia orgánica entre los suelos con cobertura y sin cobertura vegetal y sus valores en el primer estrato estuvieron entre 2,0 y 2,5 % tomados como normales por la FAO y que incidió en el contenido de humedad.

B) Determinar la superficie específica (SE) y el Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) de los suelos de las fincas

-Los valores obtenidos de SE fluctuaron de 6,14m².g⁻¹ en fincas con riego suprafoliar sin cobertura a 7,77 m².g⁻¹ en el subfoliar sin cobertura. Sin embargo, no hubo diferencias significativas.

-La correlación de la SE con el contenido de humedad obtenido en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad es baja ($R^2=0,23$).

-La correlación de la SE con los contenidos de humedad en los potenciales bajos de succión de la curva de retención (0,10 y 0,30 bar), fueron muy significativos ($R^2 = 0,94$ y $0,87$, respectivamente).

-No se observó una correlación significativa entre la SE y el contenido de arcilla ($R^2 = 0,0026$), limo ($R^2 = 0,075$) o arcilla más limo ($R^2 = 0,129$).

-El ANOVA de la SE, considerando la cobertura, profundidad en el perfil y sistema de riego, determinó que existen interacciones de los efectos de la cobertura con el riego, con un 95% de nivel de confianza.

-El IHO fue mayor en los suelos con cobertura vegetal y sistemas de riego suprafoliar y subfoliar, respecto a los suelos sin cobertura vegetal.

La densidad crítica del suelo determinada en el punto donde el $IHO = 0$, fue de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ en las fincas con suelos franco-arenosos y franco-limosos. Este valor representa condiciones restrictivas para el crecimiento de la plantas.

-En los suelos con cobertura vegetal y los dos sistemas de riego, el límite superior del IHO estuvo marcado por Θ_{cc} , y el límite inferior por Θ_{PMP} , en densidades aparentes de suelo de $1,1$ hasta $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$. Para mayores densidades, el límite superior fue Θ_{PA} y el límite inferior Θ_{RMP} (riego suprafoliar) o Θ_{PMP} (riego subfoliar con cobertura).

-En los suelos de las fincas sin cobertura vegetal y bajo los dos sistemas de riego, el límite superior del IHO es Θ_{cc} y el inferior es Θ_{PMP} , para densidades aparentes de suelo de $1,1$ a $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$. Para valores de densidad aparente mayores a $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$, el límite superior es Θ_{PA} y el límite inferior es Θ_{RMP} .

C) Determinar el grado de resistencia a la penetración del suelo (RPS) antes y después de la aplicación de los mejoradores en los diversos tratamientos, hasta 50 cm de profundidad, con el penetrómetro digital

-La RPS en el perfil del suelo presenta los valores mayores en fincas con sistemas de riego suprafoliar, en las capas de 20-30cm en el testigo (943,0 Kpa) y en el estrato de 10 - 20 cm en el de cobertura vegetal (1086,78 Kpa).

-La resistencia a la penetración del perfil del suelo tuvo mayor incidencia en las capas de 0-20 y de 20-30 cm, mostrando que todos los sistemas de riego no son estadísticamente diferentes con RPS de 790,58; 857,51; 832,96 y 813,02 Kpa para los sistemas de riego subfoliar con cobertura, suprafoliar sin cobertura, suprafoliar con cobertura y subfoliar sin cobertura, respectivamente.

-La compactación inducida en laboratorio determinó valores de densidad crítica de suelo (dsc) de $1,76 \text{ g.cm}^{-3}$ y contenido de humedad óptimo de 15,6% en el testigo; $dsc = 1,68 \text{ g.cm}^{-3}$ y contenido de humedad óptimo de 19,09% en el sistema de riego suprafoliar; y una $dsc = 1,62 \text{ g.cm}^{-3}$ y contenido de humedad óptimo de 14,85% en sistema de riego subfoliar.

-En suelos con contenidos de materia orgánica superior al 2%, la prueba Proctor generó una curva de menos pendiente, y estos suelos son más resistentes a la compactación que aquellos con menor contenido en materia orgánica.

-Los suelos que poseen predominio de partículas de limo, presenta mayores riesgos de compactación, contrariamente a aquellos con altos contenidos de materia orgánica.

-En el sistema de riego subfoliar, la presencia de cobertura en la superficie del suelo no produjo diferencias significativas en la porosidad. Los valores fueron de 43,64 % con cobertura, y 39,60% en el tratamiento sin cobertura.

D) Evaluar la distribución de la lámina de agua dispersada por los aspersores mediante los coeficientes de uniformidad, coeficiente de variación y distribución de la intensidad pluviométrica del agua de riego, y conocer su incidencia en la compactación del suelo

-La intensidad pluviométrica que generan los sistemas de riego suprafoliar es de 12,77 mm.h⁻¹, superior a la velocidad de infiltración (10,36 mm.h⁻¹), lo que provoca escorrentía.

-La intensidad pluviométrica de los sistemas de riego subfoliar es de 3,57 mm.h⁻¹ mientras que la velocidad de infiltración de estos suelos es de 6,09 mm.h⁻¹, por lo que este es un sistema idóneo en la producción de banano al evitar la formación de escorrentía superficial.

-En los sistemas de riego suprafoliar y subfoliar, el coeficiente de uniformidad fue de 58,57% y 70,44%, y la distribución de uniformidad de 42,90% y 53,40 %, respectivamente. Estos valores son inferiores al rango señalado por Keller (1990) para considerar una distribución normal de la lámina de agua.

-El índice de grosor de la gota de agua calculado para el sistema de riego suprafoliar es de 3,53 (<7,0) por lo que se consideran gotas demasiadas gruesas y con potencial para producir sellado y encostramiento. En el sistema subfoliar, este valor fue de 9,59, que entra dentro del rango recomendable (entre 7 y 17).

- El índice de estabilidad estructural (IEE) en el testigo tanto en el riego suprafoliar como en el subfoliar subfoliar tuvo valores inferiores a 5 (4,97 y 4,25, respectivamente). Por esta razón, estos suelos son evaluados como suelos degradados. En el resto de tratamientos, los valores estuvieron entre 5 a 7, que los convierte en suelos con alto riesgo a la degradación.

-El único suelo con potencial para la formación de costras según el índice de encostramiento (IE) fue el suelo testigo bajo riego suprafoliar (valor del índice=1,96).

-El riego subfoliar no afecta de manera directa a las propiedades físicas del suelo, mientras que el suprafoliar genera gotas con alta energía cinética capaz de disgregar

agregados y producir un sellamiento o encostramiento en los horizontes superficiales del suelo.

E) Evaluar la efectividad de métodos físicos (roturación), químicos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y biológicos (cobertura vegetal) como mejoradores de la compactación del suelo a través de las propiedades físicas

-Que la roturación fue el tratamiento que permitió bajar la resistencia a la penetración a 157,78 Kpa en el estrato de 0 -10 cm seguido de la aplicación de yeso con 450,77 Kpa.

-Se encontró una correlación positiva de la resistencia a la penetración del suelo con la densidad aparente ($R=0,43$), y negativa con el contenido en materia orgánica ($R=-0,71$).

-Los valores medios de densidad aparente disminuyeron con la roturación y el yeso agrícola (1,12 y 1,21 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente) en comparación con el valor del suelo testigo (1,37 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), mientras que no se encontró un efecto significativo en esta propiedad con el empleo de cobertura vegetal (1,39 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Como consecuencia, los tratamientos con yeso agrícola y roturación evidenciaron un aumento de la porosidad del suelo respecto al testigo, con valores de 55,16% 60,11% en los primeros 10 cm.

-La densidad de suelo crítica (dsc) promedio en los suelos con riego suprafoliar en el tratamiento testigo, fue de 1,73 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y la humedad óptima promedio de 17,46%, mientras que con la aplicación de yeso en el mismo sistema, la dsc fue 1,68 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y la humedad óptima de 19,09%.

-Con la roturación se logró obtener densidades aparentes de hasta 0,97 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en los primeros 10 cm de profundidad, similares a los obtenidos por López-González (2012) empleando el mismo método. Estos valores no representan niveles críticos en los diagramas texturales de densidad.

-La cobertura vegetal incidió en el mayor porcentaje de valores medios de porosidad de 42,15% en riego suprafoliar con cobertura y de 38,04% en suprafoliar sin cobertura.

-La roturación del suelo permitió incrementar el contenido de materia orgánica en el primer estrato con respecto al testigo, de 1,99% a 2,68%. También la aplicación de yeso

agrícola mejoró los niveles de materia orgánica en el suelo provocando una mayor retención del agua.

-Los tratamientos con la aplicación del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y la roturación, considerando los valores medios, arrojaron los más altos porcentajes de porosidad con valores de 53,16 y 56,68% respecto al testigo de 38,04% en el sistema de riego suprafoliar y 51,21 % y 56,31 % frente al testigo de 39,60%, en el sistema subfoliar.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAIRA SANTOS V.; PÉREZ DE VARGAS A. (1996). *Métodos Multivalentes en Bioestadística*: 127 -216.

AL- ADAWI, S.S.; REEDER (1996). Compactation and subsolling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans of the ASAE* 39: 1641-1649.

ÁLVAREZ N. (2006). Estudios de la compactación de los suelos en agricultura de conservación. *Vida Rural* 64, 4pp.

AMEZQUITA, E.; CHAVEZ, L. (1999). La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. *Costarricense de la Ciencia del Suelo*, San José, Costa Rica, 24 pp.

ANIKWE, M.; EZE, J.; IBUDIALO, A. (2016). Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava in a degraded ultisol in agbani, south-eastern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 158: 32-38.

ATALA ABAD, C.A. (2011). Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares fino (arenas) compactados, usando equipo de penetración.

ATWELL, B.J. (1993). Response of roots to mechanical Impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33(1): 27-40.

AWADHWAL, N.K.; THIERSTEIN, G.E. (1985). Soil crust and its impact on crop establishment: A review. *Soil and Tillage Research* 5: 289-302.

BAUTISTA CAPETILLO, C.F; PLAYAN, E.; SALVADOR, R.; MONTERO, J.; BURGUETE, J.; TARJUELO, J.M.; GONZÁLEZ, T.J. (2008). Energía cinética de las gotas emitidas por un aspersor. *Congreso Nacional de Riegos*.

BAUTISTA CAPETILLO C.; MÁRQUEZ-VILLAGRANA, H.H.; ZAVALA-TREJO, M.;PLAYÁN-JUBILLAR, E. (2013). Caracterización de las gotas emitidas por un

aspersor de impacto de dos boquillas, aplicando técnica fotográfica. Universidad Autónoma de Zacatecas México. *Ciencias del Agua* volumen 4(5): 147 -163.

BAVER, L.D., GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. (1991). *Física de Suelos*. Limusa, México: 529pp.

BECERRA, C.; MADERO, E.; HERRERA, O.; AMÉZQUITA, E. (2005). Caracterización espacial de la compactación en terrenos agrícolas de CIAT, Colombia. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 8(16): 33-39.

BOIFFIN, J. (1985). Stages and time-dependency of Soil Crusting in situ. In: *Assess of soil surface Crusting*. Proc. Symposium ISS IBG Ghent (BELL).

BOWLES J.E. (2006). Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (2700 KN. m.m⁻³) (Prueba Proctor modificado), ASTM D – 1557, 13pp.

BENGOUGH, A. G. (1991). The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. In: Smith, K.A.; Mulling, CH. (eds). *Soil Analysis Physical Methods*. Marcel Dekkes, In. New York: 431- 445.

BLANCO R. (2009). *La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica, como mejoradores de la compactación del suelo*. Universidad de Málaga.

BRAY, R.H.; G.W. KURTZ (1945). Determination of total organic and available farms of phosphorus in soils. *Soil Sci*. 59: 3945.

BRUAND, A.; HARTMANN CH.; RATANA-ANUPAP, S.; SINDHUSEN, P.; POSS, R.; HARDY, M. (2004). Composition fabric and porosity of an Arenic Haplustalf of Northeast. Thailand: Relation to penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1): 185-193.

CASTELLANOS, J.Z. (2000). *Manual de interpretación de Análisis de suelo y Aguas*. Segunda edición. Intagri. S.c. Guanajuato. México. 226p.

CERANA J. (2005). Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un Vertisol. *VII jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo ZNS'05* Vol. VII: 159-163.

CERANA, J.; POZZOLO, O.; BENAVIDEZ, R.; RIVAROLA, S.; WILSON, M.; DE BATTISTA, J.J. (2004). La determinación de la resistencia mecánica a la penetración para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas productivos. *R Filgueira y F Micucci*: 55-73.

COLLARES G.L. (2005). *Compatção em Latossolo e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas*. Universidade Federal de Santa María. Centro de Ciências Rurais. Tese de Doutorado em Ciencia do Solo: 26-27.

CORTES C.; CAMACHO, J.; LEIVA, F. (2013). Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agronómica*, 62(3).

CHARTRES, C.J.; GEEVES, G.W. (1998). The impact of soil seals and crusts on soil water balance and runoff and their relationship with land management. *Advances in GeoEcology*, 31: 539-548.

CHEN, K.; DICK, W. (2011). Gypsum as an Agricultural Amendment, General Use Guidelines. The Ohio State University. 36pp.

CLARK, J.T., et al. (2004). Soil Surface property and soybean yied response to corn stover grazing. *Agron. J.* 96: 1364-1371.

CRUZ, J.; NONATO ROCHA, S.; CAMACHO, J.; CASTRO, R. (2010). Spatial analysis of Physical attributes and organic carbon from yellow – red alfissol with sugarcane crop. *Ciencias e Agrotecnologia Lavras*, 34(2): 217- 278.

DAMIANO F. MOSCHINI R.C. (2011). Intervalo Hídrico Optimo en suelos Argiudoles plantados con *Eucalyptus dunnii* MAIDEN CI. *Suelo (Argentina)* 29: 1-11.

DANIELS, W.L. (1997). Managing compacted and heavy (clayey) soils. *The Virginia Gardener Newsletter* 8 (6):5pp.

DA SILVA AP.; BD. KAY. (1997a). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877-883.

DA SILVA AP.; BD. KAY (1997b). Effect of water content variation on the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Am. J.* 61: 884-888.

DEMUNER G.; CADENA ZAPATA, M.; MAGAÑA, C.; GABRIEL, S.; ZERMEÑO GONZALEZ, A.; SÁNCHEZ PÉREZ, F.D.J. (2012). Efectos de tres mejoradores de labranza y mejoradores del suelo en la disponibilidad de humedad y volumen de exploración de raíces. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro 1923, C.P. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(SPE4): 719-727.

DEXTER, A.R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro- relief of tilled soil. *J. of Terramech.* 14(1): 11-22.

DIAZ, J. (2000). Compactação do Solo. *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 1: 55-94.

DONSOVA, K.; LEE, Y.B.; SLATER, B.K.; BIGHAN, J.M. (2005). *Gypsum for agricultura Use in Ohi- Sources and Quality of available products*. The Ohi State University. 5pp.

ESTEVEZ, G.; EUGENIO, A. (2006). *Guía sobre la herculización*. CABANA. Machala.

FAO (s.f). *Soluciones para la compactación del suelo. Degradación de la estructura del suelo*. Material/cd 27.

FERNANDEZ, M.J. (1997). *Características físicas- mecánicas de suelos de cultivo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad da Coruña 278p.

FERRE, P.A.; TOPP, G.C. (2002). *Sonda de Reflectometría de Dominios Temporales (TDR)*: 434 -446.

FIORIN T. (2008). *Estimativa da Infiltração de água no solo a partir de pedofunções*. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências. Rurais. Tese de Doutorado: 8-18.

FONTANELA E. (2012). *Preparos e propriedades físicas de um solo arenoso para cana – de açúcar e mandioca no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de ciências Rurais: 58- 65, 132.

FONSECA de CARVALHO D. (2000). *Influencia de la Intensidad precipitación en la pérdida de suelo y las características de infiltración del agua en un suelo plano, utilizando un simulador de lluvia*. Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

GABRIELS, D., HORN, R.; VILLAGRA, M.M.; HARTMAN, R. (1997). Assessment, prevention and rehabilitation of soil structure caused by soil surface sealing, crusting and compaction. In: Lal, R. et al. (Eds). *Methods for Assessment of Soil Degradation. Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida: 129-165.

GARCÍA A. (2014). *Aplicación de métodos geofísicos al estudio de suelos*. Universidade da Coruña. Tesis Doctoral: 18-20.

GARCÍA, A.H.; JAIME, Y.N.M.; SALAZAR, L.D.; BASTARDO, F.A.S.L.; CONTRERAS, A.M.Z. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 9(4): 937-950.

GELATI, P.R., SARLI, G.O., SORACCO, C., LOZANO, L.A.; FILGUEIRA, R.R. (2009). Influencia de la materia orgánica en la superficie específica de un Arguidol típico *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XLI No 2, 117 -126.

GERRARD, A.J. (1982). The use of hand operated soil Penetrometers. *Area* 14: 227- 234.

GIRALDEZ J.V., VANDERLINDEN, K., JIMÉNEZ-HORNERO, F.J.; LAGUNA, A.M. (2001). Análisis de la evolución de la humedad del suelo. *Estudios en la zona no saturada del suelo (ZNS'11)* Vol. 10: 13-18.

GONZALEZ, O.; IGLESIAS, C.; HERRERA M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18 (2): 57-63.

GOVERS, G.; POESEN, J. (1988). Assessment of the interrill and rill contributions to total soil. *Loss from an upland Field plot Geomorphology* 1: 343-54.

GROHMANN, F. (1972). Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do Estado de São Paulo I – Estudo de perfis com horizonte B. textural e B latossólico. *Bragantia* 31: 145-165.

GROVES, S.T.; ROSE, S.C. (2004). Calibration equations for Diviner2000 capacitance measurement of volumetric soils water content of six soils. *Soil Use and Management* 20: 96-97.

GUBIANI P.I.; REICHERT J.; REINERT D. (2013). Indicadores Hídricos-Mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37(1).

GUBIANI PAULO I. (2008). *Tempo para ocorrência à penetração Restritiva do feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação*. Universidade Federal de Santa Maria. Tese doutorado. 108pp.

GUBIANI PAULO I. (2004). Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (3). Viçosa.

GUBIANI PAULO I. (2012). *Regularidade de resposta do milho à compactação de solo*. Tesis doctoral. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. Programa de Pós – Graduação em Ciência do Solo: 62-65.

GUITIAN F.; CARBALLAS, T. (1976). *Técnicas de análisis de suelos*. Ed Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288pp.

GUTIERREZ J. (2010). Prácticas de manejo y conservación de suelos en la región de Uraba-Colombia. Estudios de caso en el cultivo de banano. CENIBANANO- AUGURA.

GUTIERREZ, E.M.; GALAVIZ S.A.; CASTRO, D.A. (1987). *Variación de la textura, densidad, porosidad y otras propiedades físicas de los sedimentos del talud continental al SW de la península Baja California*. Instituto de ciencias del Mar y Limnología, México.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W. (2005). Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and posible solutions. *Soil Till Res.* 82: 121- 146.

HENAO, M. (2010). Práctica de laboratorio. *Métodos de análisis de suelos* (versión 4) Colombia Univ. Nac. De Colombia. Facultad de Agronomía.

HERRANZ, J.; PEIXOTO, H.; CERISOLA, C.; SÁNCHEZ, V. (2000) An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance moisture content an soil depth. *Journal of Terramechanics* 37(4): 167-184.

HIDALGO, J.; PASTOR, M.; HIDALGO, J.C.; CAJA, S.D. (2003). Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riego en olivar. *Estudios de la ZNS* Vol. VI.

HORN; SMUCKER (2005). Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil Till Res.* 82: 5-14.

IMHOFF, S.; PIRES DA SILVA, A.; DIAS JUNIOR, M.; TORMENA, C.A. (2001). Quantificação de Pressoes críticas o crecimiento das plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(1): 11-18.

INGARAMO, O.E. (2003). *Indicadores físicos de la degradación del suelo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña.

IOWA STATE UNIVERSITY. (2012). *Soil and Plant Analysis Lab*. G501. Agronomy Hall.

JARAMILLO D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Colombia: 103-109, 121-122, 166-167, 181-186, 203-224, 237-241.

JUNG, K.Y.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; LEE, K.S.; CHUNG, S.O. (2010). Soil compaction varies by crop management system over a clay pan soil landscape. *Soil & Tillage Research* 107(1): 1-10.

JURY. W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H (1991). *Soil Physics*. John Wiley & Sons. New York. 328p.

KELLER, J.; BLIESNER, R.O. (1990). *Sprinkle and Tickle Irrigation*. AVI Book, Van Nostrand Reinhold. New York.

KLEIN, V.A. (2006). Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinarias* 15(1): 26-32.

KRÜGER H. et al., (2008). *Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continua*. INTA. EEA: 9pp.

LETEY, J. (1995). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.

LINARES J. (2004). *Efecto de la intensidad y evolución de corto plazo de las propiedades físicas, erosionabilidad, humedad y temperatura del suelo*. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia, España.

LOPEZ, S.; GONZÁLEZ, G. (2012). Efecto de labranza primaria en la calidad física del suelo, evaluada mediante permeámetro de disco. *Tecnologías y Ciencias del Agua*: 127-141.

LOWERY B.; MORRISON, J.E. (2002). Soil Penetrometers and Penetrability. In: Dane, J.H.; Clarke G. (eds). *Methods of Soil Analysis Part. 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 363-388.

MARTINEZ-GAMIÑO, M.A.; WALTHALL, P.M. (2000). Physical, Chemical and Mineralogical Properties Affecting Soil Crust Formation in Soils of Mexico and Louisiana USA. *Terra* 18(3) 184.

MELANI E. (2013). *Alteración de las propiedades mecánicas de suelos irrigados con agua de altas concentraciones de sodio*. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.

MESTAS, R. (2011). *Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña, 77-97.

MOGOLLON M. (2012). *Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la sabana de Bogotá*. Universidad Nacional Colombia.

MON, R. (2008). *Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda*. Tesis Doctoral. Universidade de Coruña, 14-32.

MONTERO, J. (2000). *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS)*. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla La Mancha. 282pp.

MUR M.; BALBUENA R. (2014). *Compactación de un suelo Argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 32 (1): 1-12.

OLALLA F.M.; VALERO, J.A. (1993). *Agronomía del Riego*. Universidad de Castilla La Mancha. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid: 23- 64, 615- 675.

OLIVEIRA G.C.; SEVERIANO E.C.; MELLO C.R. (2007). Dinâmica da Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microregião de Goiana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11(3): 265- 270.

ORELLANA, J.A., PILATTI, M.A.; GRENÓN, D.A. (1997). Soil quality: an approach to Physical State assessment. *Journal of Sustainable Agriculture* 9(2-3): 91- 108.

ORJUELA-MATTA, H.M.; RUBIANIO-SANABRIA; CAMACHO-TAMAYO J.H. (2011). Spatial variability of hidronamic parameters in the native savanna of the Colombian Eastern plains. *Agronomía Colombia* 29(1): 83-90.

OROZCO J.; PEREZ O. (2004) *Tensión de la humedad del suelo y fertilización nitrogenada del plátano*. Campo Experimental Tecoman, México vol. 40 (2).

PAZ- GONZÁLEZ A.; GÓMEZ M.J.; TABOADA, M.T. (1996). Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo. *Invest. Agr. Prod. Veg.* 11(1): 133-160.

PETERSEN, L.W.; MOLDRUP, P.; JACOSSEN, O.H.; ROLSTON, D.E. (1996). Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Sci.* 161: 9-21.

PILATTI M.A.; de ORELLANA, YJ. (1993). Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad II: El intervalo hídrico óptimo. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mendoza: 21-22.

PROFFITT, A.P.; ROSE, C.W. (1991). Soil erosion processes 1. The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Aust. J. Soil Res.* 29: 67-183.

RAMIREZ-LÓPEZ L.; REINA A; CAMACHO-TAMAYO, J.H. (2008). Variabilidad espacial de atributos de un Tipic Haplustox de los llanos orientales de Colombia. *Eng. Agric.* 28 n. 1: 55-63.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.; REINERT, A.S.; HORN, D.J.; HAKANSSON R. (2009). Reference bulk density and critical degree- of compactness for no till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research* 102(2): 242-254.

REINERT, D.J. et al., (2008). Límites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 32: 1805-1806.

REYES, W. (2010). Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Bioagro* 22 (1): 29-36.

RIBES M. (2001). *Estudio de compactación de los suelos sometidos a un proceso de nivelación láser*. Universidad de Lleida. España.

RODRIGUEZ DA SILVA V. (2003). Propiedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação: 34-38.

ROSSITER D., VARGAS R. (2004). *Metodologías para el levantamiento del recurso suelo*. International Institute for Geo-information Science & Earth observation ITC. 80 pp.

RUIZ, H.A.; OLIVERIO SARLI, G., GONÇALVES REYNAUD SCHAEFER, C.E., FILGUEIRA, R.R., & SILVA DE SOUZA, F. (2016). *La superficie específica de oxisoles y su relación con la retención hídrica*. Facultad de Ciencias. Agrarias. Universidad Nacional del Cuyo, Cuyo, 48(2): 95-105.

RUKS, L.; GARCÍA, F.; KAPLÁN, A.; PONCE DE LEÓN, J.; HILL, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República: Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay: 68 pp.

SAONE, B.D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research* 16: 179-201.

SENTEK (1999). *Diviner 2000. Guía del usuario 1.0*.

SENTEK (2001). *Calibration of Sentek Pty Ltd. Soil Moisture Sensores*. Stepney, Australia.

SENTEK (2007). *Revolutionizing irrigation scheduling, fertilizer and salinity management. IrriMAX 7.1*: 217pp.

SIEGEL-ISSEM, C.M.; BURGER, J.A.; POWER, R.F.; PATTERSON, S.C. (2005). Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Science Society of America Journal* 69: 215-226.

SILVA, A.P. et al. (1994). Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of American Journal* 58(6): 176-180.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. (1997). Estimating the last limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal* 61(3): 877-883.

SILVA, V.R. (2003). *Propiedades físicas e hídricas em solo sob diferentes estados de compactação*. Santa María. Universidade Federal de Santa María. Tese de Doutorado em Agronomia: 171pp.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CAMARGO, M.B.P. (2008a). Variabilidade espacial do armazenamento e da perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. *Bragantia* 67(1): 213-223.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. (2008b). Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia* 67(1): 203-211.

SHAXSON F.; BARBER R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. En FAO No 79; p107.

STARR, J.; PALTINEANU, I. (2002). *Methods of Soil Analysis*. American Agronomy Society. Madison, US: 463-474.

STEED, G.R.; REEVES, T.G.; WILLATT, S.T. (1987). Effects of deep ripping and liming on soil water deficits, sorptivity and penetrometer resistance. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 27(5): 701-705.

SUÁREZ, L. (2012). *Efectos de la herculización frente a los aireadores en banano*. Tesis para la obtención del título de ingeniero agrónomo. Universidad Técnica de Machala: 35p.

TARJUELO, J.M. (2005). *El riego por aspersión y su tecnología*. Mundi Prensa. Madrid.-España.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.D.; GONÇALVES, A.C.A. (2002). Densidade, porosidade e resistencia à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola* 59 (4): 795- 801.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M.D. (2007). Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 31(2): 211-219.

TORMENA C.A.; DA SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de un Latossolo roxo sob. plantío directo. *R. Bras. Ci. Solo* 22: 573-581.

USON, A. et al. (2010). *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Primera. España: Prensas Universidad de Zaragoza. p 515.

USDA (2010). *Soil survey manual* chapter tw.

USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. 88 pp.

VALADÃO, S.E. (2014). *Intervalo Hídrico Ótimo de suelo y estado de humedad de las plantas en sistema integrado de producción agrícola y pecuaria en el subtrópico de Brasil*. Universidade Federal de Rio Grande Do Sul: 34- 45.

VERONESE JUNIOR, V.; CARVALHO, M.P.; DAFONTE J.; FREDDI, O.S.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; INGARAMO O.E. (2006). Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of a Brazilian Ferralsol. *Soil & Tillage Research* 85: 166-177.

VOORHEES. W.B. (1983). Relative effectiveness of tillage and natural forces alleviating wheel induced soil compactation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 129-133.

VENANZI, S.; VALLATI, A.; KRUGER, H. (2002). Crecimiento temprano del trigo en función de la densidad aparente del suelo. *Actas del XVIII CACS*. Puerto Madryn. 6p.

VILLARREAL-NÚÑEZ, J.; PLA-SENTIS, I.; AGUDO-MARTÍNEZ, L.; VILLALÁZ-PÉREZ, J.; ROSALES, F.; POCASANGRE, L. (2013). Índice de calidad de suelos en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía mesoamericana*, 24(2): 301-315.

WAKINDIKI, I.I.C.; BEN-HUR, M. (2002). Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Jour.* 66: 897-905.

WILLIAMS, S.; RWEIL (2004). Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. Jour* 68: 1405-1409.

WILSON, M.G., SASAL, M.C.; CAVIGLIA, O. (2008). Densidad del suelo crítica para la productividad de un Molisol y un Vertisol. *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 7pp.

WILSON, M., PAPANOTTI, O., PAZ GONZÁLEZ, A., DÍAZ UCHA, E. (2006). Ecuación de ajuste entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un lote de siembra directa CACS Salta y Jujuy p108.

ZERPAS, A.G.; SOSA, A.O.; BERARDI, J.; BOLATTI, J.P.; GALINDO, A.; MALDONADO, J. (2013). La resistencia mecánica a la penetración en pasturas. Publicación cuatrimestral de la Facultad de Ciencias Agrarias. *Agromensajes* 35: 64-68.

7. ANEXOS

TABLAS DE ANEXO

Tabla A - 1. Valores de datos meteorológicos promedios de la estación Santa Inés – Machala, período 1989 -2010.

Meses	Temperatura (°C)	heliofania Horas.mes ⁻¹	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (Km.día ⁻¹)	Evaporación (mm.mes ⁻¹)	Precipitación (mm.mes ⁻¹)
Enero	26,30	102,26	79,80	33,60	119,00	100,00
Febrero	26,60	100,27	79,90	36,00	109,10	181,60
Marzo	26,90	136,76	79,10	31,20	127,90	153,70
Abril	27,00	142,64	79,40	36,00	124,20	81,90
Mayo	26,20	114,80	81,30	28,80	104,30	30,50
Junio	24,60	75,17	84,80	28,80	75,30	15,90
Julio	23,60	72,11	85,50	31,20	74,60	11,50
Agosto	23,00	64,80	86,10	36,00	74,80	10,00
Septiembre	23,20	43,32	86,70	33,60	70,90	11,90
Octubre	23,30	34,92	85,50	33,60	68,60	17,10
Noviembre	23,90	46,31	84,90	33,60	73,90	20,30
Diciembre	27,20	85,31	81,30	33,60	98,80	42,10
Suma	301,80	1018,67	994,30	396,00	1121,40	676,50
Promedio	25,15	84,89	82,86	33,00	93,45	56,38

Tabla A -2. Cálculo de la evapotranspiración potencial, método de Thornthwaite, Machala.

MES	T°C.	i	I		a	E (cm/mes)	E (mm/mes)	f corrección (mes)	EVTP ajustada (mm/mes)	EVTP ajustada (mm/día)
Enero	26,30	12,35	138,69		3,30	13,18	131,81	1,02	134,44	4,34
Febrero	26,60	12,56		13,68		136,83	1,02	139,57	4,98	
Marzo	26,90	12,78		14,20		141,98	1,01	143,40	4,63	
Abril	27,00	12,85		14,37		143,73	1,00	143,73	4,79	
Mayo	26,20	12,28		13,02		130,16	1,00	130,16	4,20	
Junio	24,60	11,16		10,58		105,76	0,99	104,70	3,49	
Julio	23,60	10,48		9,22		92,24	0,99	91,32	2,95	
Agosto	23,00	10,08		8,47		84,73	1,00	84,73	2,73	
Septiembre	23,20	10,21		8,72		87,19	1,00	87,19	2,91	
Octubre	23,30	10,28		8,84		88,43	1,01	89,31	2,88	
Noviembre	23,90	10,68		9,62		96,16	1,02	98,08	3,27	
Diciembre	27,20	12,99		14,73		147,27	1,02	150,21	4,85	
Promedio	25,15	11,56	138,69		3,30	115,52	115,52	1,01	116,40	3,83

Tabla A -3. Balance Hídrico para la Estación Meteorológica Granja Sta. Inés, provincia de El Oro, cantón Machala.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Agos.	Sep.	Oct	Nov	Dic	Anual
Evapot.potencial	92	86	102	95	83	64	65	69	71	69	73	85	954
Precipitación	197	259	232	159	94	73	54	45	46	71	74	98	1402
(P-ETP)	105	173	130	64	11	9	-11	-24	-25	2	1	13	448
Sum (P-ETP)							-11	-35	-60				
Almacenaje	100	100	100	100	100	100	89	70	54	56	57	70	996
Var. De alm	30	0	0	0	0	0	-11	-19	-16	2	1	13	±46
Evapot. Real	92	86	102	95	83	64	65	64	62	69	73	85	940
Déficit de agua	0	0	0	0	0	0	0	5	9	0	0	0	14
Exc. de agua	75	173	130	64	11	9	0	0	0	0	0	0	462
Escurrimiento	38	105	118	91	51	30	15	8	4	2	1	0	463
Humedad Total	138	205	218	191	151	130	104	78	58	58	58	70	1459

Tabla A - 4. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego subfoliar, Finca El Cisne.

Composición mineralógica	Capas del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Arena (%)	51,0	52,4	52,5	46,7	48,9
Limo (%)	34,0	32,4	34,5	43,0	38,6
Arcilla (%)	15,0	15,2	13,0	10,3	12,5
Clase textural	Fco	FcoA	FcoA	Fco	Fco

Fco = Franco; FcoA = Franco Arenoso

Tabla A - 5. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego suprafoliar, Finca El Cisne.

Composición mineralógica	Capas del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Arena (%)	48,9	49,5	55,2	51,0	49,5
Limo (%)	43,2	42,0	38,5	42,0	44,5
Arcilla (%)	7,9	8,5	6,3	7,0	6,0
Clase textural	Fco	FcoA	FcoA	Fco	Fco

Fco = Franco; FcoA = Franco Arenoso

Tabla A - 6. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego subfoliar Finca La Fátima.

Composición mineralógica	Capas del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Arena (%)	49,0	50,5	54,7	51,3	48,0
Limo (%)	39,0	39,9	37,0	37,0	39,0
Arcilla (%)	12,0	9,6	8,3	11,7	13,0
Clase textural	Fco	FcoA	FcoA	Fco	Fco

Fco= Franco; FcoA= Franco arenoso

Tabla A -7. Texturas de las diversas capas de suelo en los sistemas de riego suprafoliar Finca El Carmen.

Composición mineralógica	Capas del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Arena (%)	48,5	53,0	51,0	54,0	54,7
Limo (%)	41,0	38,0	44,5	39,0	42,0
Arcilla (%)	10,5	9,0	4,5	7,0	3,3
Clase textural	Fco	FcoA	FcoA	Fco	Fco

Fco = Franco; FcoA = Franco arenoso

Tabla A - 8. Densidad aparente de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	1,20	1,34	1,37	1,50	1,45
M2	1,44	1,50	1,37	1,32	1,30
M3	1,53	1,54	1,42	1,39	1,40
M4	1,32	1,56	1,58	1,55	1,35
M5	1,35	1,41	1,54	1,27	1,23
M6	1,40	1,50	1,46	1,34	1,23
M7	1,44	1,50	1,44	1,37	1,30
M8	1,45	1,46	1,40	1,34	1,28
M9	1,32	1,34	1,29	1,28	1,36
SUMA	12,45	13,15	12,87	12,36	11,90
PROMEDIO	1,38	1,46	1,43	1,36	1,31

Tabla A - 9. Densidad aparente de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	1,41	1,37	1,35	1,39	1,30
M2	1,25	1,35	1,32	1,35	1,31
M3	1,62	1,61	1,59	1,58	1,44
M4	1,30	1,30	1,39	1,40	1,34
M5	1,33	1,45	1,28	1,22	1,21
M6	1,35	1,45	1,37	1,33	1,39
M7	1,42	1,45	1,52	1,41	1,29
M8	1,44	1,50	1,35	1,40	1,35
M9	1,30	1,30	1,40	1,27	1,29
SUMA	12,42	12,78	12,57	12,35	11,92
PROMEDIO	1,38	1,42	1,40	1,37	1,32

Tabla A - 10. Densidad aparente de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	1,29	1,43	1,39	1,38	1,36
M2	1,27	1,35	1,33	1,31	1,28
M3	1,47	1,60	1,28	1,50	1,39
M4	1,18	1,25	1,37	1,35	1,37
M5	1,45	1,54	1,50	1,34	1,24
M6	1,22	1,37	1,22	1,25	1,43
M7	1,39	1,42	1,43	1,29	1,41
M8	1,22	1,33	1,44	1,43	1,33
M9	1,33	1,45	1,38	1,35	1,40
SUMA	11,82	12,74	12,34	12,20	12,21
PROMEDIO	1,31	1,42	1,37	1,36	1,36

Tabla A - 11. Densidad aparente de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	1,30	1,30	1,38	1,25	1,21
M2	1,33	1,32	1,27	1,31	1,31
M3	1,50	1,54	1,51	1,65	1,50
M4	1,40	1,35	1,30	1,34	1,31
M5	1,44	1,34	1,45	1,34	1,28
M6	1,34	1,36	1,41	1,45	1,45
M7	1,52	1,55	1,52	1,55	1,47
M8	1,62	1,70	1,73	1,66	1,30
M9	1,16	1,20	1,28	1,22	1,15
SUMA	12,61	12,66	12,85	12,77	11,98
PROMEDIO	1,40	1,41	1,43	1,42	1,33

Tabla A - 12. Densidad real (g.cm⁻³) de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
M1	2,48	2,1	2,61	2,24	2,7
M2	2,37	2,21	2,35	2,61	2,29
M3	2,47	2,34	2,29	2,5	2,52
M4	2,4	2,95	2,48	2,31	2,75
M5	2,47	2,75	2,49	2,47	2,26
M6	2,61	2,62	2,55	2,1	2,41
M7	2,62	2,7	2,39	2,3	2,4
M8	2,51	2,42	2,44	2,75	3,2
M9	2,42	2,59	2,69	1,95	2,9
SUMA	22,35	22,68	22,29	21,23	23,43
PROMEDIO	2,48	2,52	2,48	2,36	2,60

Tabla A - 13. Densidad real (g.cm⁻³) de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
M1	2,74	2,04	2,83	2,81	2,47
M2	1,92	2,2	2,79	2,1	2,53
M3	2,3	2,61	2,11	2,3	2,37
M4	2,28	2,68	2,63	2,63	2,29
M5	2,35	2,41	2,27	2,69	2,42
M6	2,3	2,2	2,14	2,47	2,41
M7	2,4	2,12	2,6	2,39	2,47
M8	2,2	2,44	2,9	2,45	2,59
M9	2,39	2,45	2,2	2,1	2,47
SUMA	20,88	21,15	22,47	21,94	22,02
PROMEDIO	2,32	2,35	2,50	2,44	2,45

Tabla A - 14. Densidad real (g.cm⁻³) de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
M1	1,98	2,34	2,74	2,20	2,17
M2	2,10	2,31	2,24	2,28	2,07
M3	2,20	2,30	2,48	2,31	2,28
M4	2,10	2,43	2,14	2,40	2,17
M5	2,09	2,20	2,02	2,05	2,10
M6	2,95	2,39	2,28	2,47	2,23
M7	2,41	2,20	2,45	2,23	2,35
M8	2,07	2,30	2,35	2,26	2,43
M9	2,20	2,37	2,52	2,01	2,43
SUMA	20,10	20,84	21,22	20,21	20,23
PROMEDIO	2,23	2,32	2,36	2,25	2,25

Tabla A - 15. Densidad real (g.cm⁻³) de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
M1	2,22	2,34	2,00	2,05	2,34
M2	2,17	2,29	2,28	2,37	2,07
M3	2,12	2,65	2,00	2,25	2,95
M4	2,28	2,19	2,17	2,39	2,51
M5	2,17	2,21	2,42	2,38	2,28
M6	2,43	2,25	2,21	2,18	2,27
M7	1,92	2,55	2,30	2,35	2,54
M8	2,08	2,31	2,21	2,37	1,98
M9	2,30	2,45	2,29	2,55	2,21
SUMA	19,69	21,24	19,88	20,89	21,15
PROMEDIO	2,19	2,36	2,21	2,32	2,35

Tabla A - 16. Porosidad total de un sistema de riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	51,61	36,19	47,51	33,04	46,30
M2	39,24	32,13	41,70	49,43	43,23
M3	38,06	34,19	37,99	44,40	44,44
M4	45,00	47,12	36,29	32,90	50,91
M5	45,34	48,73	38,15	49,39	45,58
M6	46,36	42,75	42,75	36,19	50,21
M7	45,04	44,44	39,75	43,48	47,92
M8	42,23	39,67	42,62	51,27	60,94
M9	45,45	48,26	52,04	34,36	53,10
SUMA	398,34	373,48	378,81	374,45	442,62
PROMEDIO	44,26	41,50	42,09	41,61	49,18

Tabla A - 17. Porosidad total de un sistema de riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	48,54	32,84	52,30	50,53	47,37
M2	34,90	38,64	52,69	35,71	48,22
M3	29,57	38,31	24,64	31,30	39,24
M4	42,98	51,49	47,15	46,77	41,48
M5	43,40	39,83	43,61	54,65	50,00
M6	41,30	34,09	35,98	46,15	42,32
M7	40,83	31,60	41,54	41,00	47,77
M8	34,55	38,52	53,45	42,86	47,88
M9	45,61	46,94	36,36	39,52	47,77
SUMA	361,68	352,28	387,72	388,51	412,06
PROMEDIO	40,19	39,14	43,08	43,17	45,78

Tabla A - 18. Porosidad total de un sistema de riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	34,85	38,89	49,27	37,27	37,33
M2	39,52	41,56	40,63	42,54	38,16
M3	33,18	30,43	48,39	35,06	39,04
M4	43,81	48,56	35,98	43,75	36,87
M5	30,62	30,00	25,74	34,63	40,95
M6	58,64	42,68	46,49	49,39	35,87
M7	42,32	35,45	41,63	42,15	40,00
M8	41,06	42,17	38,72	36,73	45,27
M9	39,55	38,82	45,24	32,84	42,39
SUMA	363,56	348,57	372,09	354,37	355,87
PROMEDIO	40,40	38,73	41,34	39,37	39,54

Tabla A -19. Porosidad total de un sistema de riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	41,44	44,44	31,00	39,02	48,29
M2	38,71	42,36	44,30	44,73	36,71
M3	29,25	41,89	24,50	26,67	49,15
M4	38,60	38,36	40,09	43,93	47,81
M5	33,64	39,37	40,08	43,70	43,86
M6	44,86	39,56	36,20	33,49	36,12
M7	20,83	39,22	33,91	34,04	42,13
M8	22,12	26,41	21,72	29,96	34,34
M9	49,57	51,02	44,10	52,16	47,96
SUMA	319,00	362,61	315,91	347,69	386,38
PROMEDIO	35,44	40,29	35,10	38,63	42,93

Tabla A -20. Porosidad de aireación de las fincas con riego presurizado con y sin cobertura, SPF –CC (suprafoliar con cobertura), SPF – SC (suprafoliar sin cobertura), SBF – CC (subfoliar con cobertura), SBF – SC (subfoliar sin cobertura).

Profundidad (cm)	SPF-CC	SPF-SC	SBF-CC	SBF-SC
10	0,00	0,00	9,07	0,00
20	2,19	1,69	7,15	0,00
30	7,33	0,00	8,50	5,67
40	8,78	0,01	10,66	0,07
50	8,61	12,05	16,26	2,39

Tabla A -21. Superficie específica (BET- m2. g-1) de las fincas con riego presurizado con y sin cobertura, SPF –CC (suprafoliar con cobertura), SPF – SC (suprafoliar sin cobertura), SBF – CC (subfoliar con cobertura), SBF – SC (subfoliar sin cobertura).

Profundidad (cm)	SPF-CC	SPF-SC	SBF-CC	SBF-SC
10	6,611	6,072	6,84	6,941
20	6,794	6,913	6,459	8,114
30	6,197	5,623	6,103	8,908
40	7,409	5,76	7,473	7,144
50	9,799	6,336	7,927	7,78

Tabla A - 22. Humedad del suelo (%) con cobertura vegetal bajo un sistema de riego subfoliar. Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	31,95	28,65	28,81	27,27	23,09
M2	21,50	22,77	24,32	18,45	24,66
M3	25,30	22,13	23,67	26,35	26,15
M4	22,95	21,25	19,88	18,52	18,02
M5	28,35	18,54	19,20	20,04	17,61
M6	22,30	21,64	21,35	16,35	20,19
M7	26,25	22,53	26,25	27,86	33,93
M8	20,45	20,71	24,20	26,53	16,02
M9	21,95	25,98	22,00	17,85	35,95
SUMA	221,00	204,20	209,68	199,22	215,62
PROMEDIO	24,56	22,69	23,30	22,14	23,96

Tabla A - 23. Humedad del suelo (%) con cobertura vegetal bajo un sistema de riego suprafoliar, Finca El cisne.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	27,71	29,47	28,50	25,86	29,55
M2	35,32	32,10	27,30	27,92	27,22
M3	23,25	19,52	17,52	22,35	22,90
M4	37,45	29,52	25,20	24,31	29,71
M5	30,95	21,90	27,84	35,30	34,44
M6	28,45	26,94	24,88	21,50	27,45
M7	24,65	23,22	21,36	20,50	24,20
M8	25,86	23,69	25,21	20,20	23,98
M9	23,52	20,55	20,66	22,60	27,98
SUMA	257,16	226,91	218,47	220,54	247,43
PROMEDIO	28,57	25,21	24,27	24,50	27,49

Tabla A - 24. Humedad del suelo (%) sin cobertura vegetal bajo un sistema de riego subfoliar, Finca La Fátima.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	36,46	27,03	20,47	27,98	27,03
M2	33,55	28,45	27,15	23,22	24,11
M3	23,32	22,61	19,71	21,27	22,75
M4	45,79	31,55	29,77	29,90	27,22
M5	23,01	23,50	20,72	30,79	27,45
M6	39,61	27,45	30,89	38,10	35,15
M7	31,78	25,11	23,78	26,51	25,55
M8	40,55	27,53	20,00	20,27	29,20
M9	33,45	23,88	27,73	29,88	16,23
SUMA	307,52	237,11	220,22	247,92	234,69
PROMEDIO	34,17	26,35	24,47	27,55	26,08

Tabla A - 25. Humedad del suelo (%) sin cobertura vegetal bajo un sistema de riego suprafoliar, Finca El Carmen.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	31,65	30,52	23,57	32,55	30,66
M2	26,70	27,61	26,58	30,94	27,02
M3	22,96	23,10	22,59	19,42	18,56
M4	22,88	25,02	31,95	31,42	30,32
M5	23,80	29,11	19,55	20,10	18,72
M6	22,05	20,35	23,91	22,75	18,75
M7	28,19	27,40	22,10	29,11	20,50
M8	23,26	20,85	19,36	20,02	14,85
M9	33,66	29,23	26,53	24,95	15,64
SUMA	235,15	233,19	216,14	231,26	195,02
PROMEDIO	26,13	25,91	24,02	25,70	21,67

Tabla A - 26. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 1.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	25,33	24,63	22,24	22,07	18,26	18,3	17,57
2	19,31	24,9	21,03	17,15	18,02	19,27	22,33
3	22,38	20,01	16,42	15,52	17,42	18,18	20,14
4	8,43	7,61	6,67	7,59	5,13	4,63	6,55
5	20,90	21,24	19,81	16,27	14,90	15,41	16,04
6	19,27	19,68	17,23	15,72	14,75	15,16	16,53
7	12,17	9,84	14,47	15,86	16,35	18,26	17,07
8	22,2	17,23	16,08	22,64	22,46	22,73	23,00
9	17,19	13,54	15,28	19,25	19,41	20,50	20,04
10	17,51	15,59	15,14	16,12	15,77	16,41	17,05

Tabla A - 27. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 2.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	25,27	24,81	22,33	22,11	18,1	18,14	17,69
2	19,15	24,72	20,44	16,46	17,98	18,68	21,45
3	22,07	20,35	16,92	15,08	17,74	18,78	20,65
4	8,73	7,97	7,18	8,00	5,32	4,89	7,2
5	21,33	21,68	19,43	16,16	15,01	15,68	16,55
6	19,31	19,90	17,26	15,56	14,83	15,23	16,7
7	11,72	10,14	13,80	15,23	15,71	18,59	16,58
8	21,94	16,88	16,88	22,38	22,24	22,89	22,57
9	16,83	13,51	15,34	18,81	18,975	20,74	19,575
10	17,42	15,78	15,26	15,89	15,69	16,69	17,12

Tabla A - 28. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 3.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	25,46	24,81	22,20	22,07	18,02	17,23	17,00
2	18,90	24,76	21,16	16,92	17,82	17,14	20,67
3	18,82	24,44	23,85	22,64	23,90	21,90	22,34
4	8,73	8,59	7,41	8,24	5,53	6,43	7,21
5	21,76	21,72	19,72	16,61	15,12	16,45	17,89
6	20,22	21,2	18,79	16,24	15,44	16,66	16,28
7	12,11	9,84	14,22	15,86	16,19	15,32	16,39
8	22,29	17,23	16,50	23,00	22,77	21,09	23,57
9	17,78	14,90	15,57	19,93	19,25	20,78	20,85
10	18,43	16,24	16,12	14,74	16,89	17,65	17,95

Tabla A - 29. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 4.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	26,07	24,95	22,6	22,51	18,66	17,56	17,23
2	21,03	25,15	21,12	16,42	17,51	17,32	20,72
3	20,10	24,72	24,03	22,86	23,99	21,23	22,67
4	8,81	8,21	7,11	7,95	5,49	7,32	7,45
5	21,55	21,33	20,01	17,19	15,30	16,86	16,43
6	15,18	14,77	13,56	12,57	10,40	15,56	16,62
7	12,14	10,53	15,12	16,08	16,38	21,23	23,71
8	22,55	17,42	16,61	22,91	22,68	20,81	20,90
9	18,04	15,28	15,80	19,97	19,34	20,83	20,92
10	18,57	16,34	16,19	15,81	16,94	17,72	18,01

Tabla A - 30. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 5.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	25,37	24,98	22,80	22,60	19,05	18,86	19,57
2	22,44	25,12	21,66	17,28	18,09	18,16	20,62
3	21,105	22,83	20,25	19,12	20,83	19,37	20,80
4	11,45	8,91	7,91	8,41	5,78	8,72	9,76
5	21,79	21,42	20,01	17,06	15,66	16,98	17,01
6	17,93	18,11	16,14	15,32	15,06	17,86	19,08
7	13,09	10,64	15,40	16,48	16,71	19,94	21,48
8	22,49	17,94	17,46	22,71	22,74	20,50	21,22
9	16,67	16,10	16,48	18,79	19,13	20,02	20,77
10	17,62	17,53	17,38	18,27	19,37	18,11	17,99

Tabla A - 31. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 6.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	24,67	25,00	23,00	22,68	19,43	20,15	21,91
2	23,85	25,09	22,20	18,14	18,66	19,00	20,51
3	22,11	20,94	16,46	15,37	17,66	17,50	18,92
4	14,08	9,61	8,70	8,87	6,06	10,11	12,06
5	22,02	21,50	20,01	16,92	16,01	17,09	17,59
6	20,67	21,45	18,71	18,06	19,71	20,15	21,54
7	14,04	10,74	15,67	16,88	17,04	18,65	19,25
8	22,42	18,46	18,30	22,51	22,80	20,18	21,54
9	15,30	16,91	17,15	17,60	18,91	19,21	20,61
10	16,67	18,71	18,56	20,72	21,80	18,50	17,97

Tabla A - 32. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 7.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	26,07	25,18	22,86	22,82	20,06	21,30	21,47
2	22,33	25,04	21,98	17,62	18,3	19,71	19,86
3	21,94	21,16	17,50	16,62	19,56	20,60	21,71
4	16,96	9,46	8,48	9,15	6,11	7,80	9,81
5	21,53	21,72	20,27	16,46	15,52	16,35	16,8
6	21,36	20,17	19,51	18,30	18,57	18,70	19,06
7	15,3	12,14	16,65	17,18	17,70	17,90	18,31
8	21,94	17,86	17,82	22,64	22,46	22,70	23,15
9	20,71	19,57	18,15	21,15	21,18	21,10	22,18
10	21,32	17,30	17,51	20,17	20,02	20,05	21,17

Tabla A - 33. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 8.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	21,50	21,35	20,18	18,90	18,75	19,50	20,14
2	22,77	24,86	21,63	17,39	18,54	18,70	18,90
3	20,06	20,82	17,07	17,73	18,66	19,30	20,02
4	17,19	8,73	8,27	8,51	5,82	9,10	10,11
5	20,86	21,98	20,27	16,69	15,63	16,31	17,51
6	15,17	16,15	17,20	16,41	16,80	17,91	17,70
7	13,97	11,49	16,23	17,39	17,25	18,20	19,40
8	20,35	17,27	17,46	22,64	22,38	21,71	22,09
9	21,52	22,30	17,71	21,43	21,63	18,37	20,18
10	21,70	22,35	18,90	19,08	20,07	19,45	21,41

Tabla A - 34. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Cisne, semana 9.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	20,30	19,23	20,23	17,81	18,34	19,23	20,21
2	21,24	21,45	21,45	17,57	18,28	19,07	20,45
3	19,19	18,00	17,14	18,23	19,25	19,45	20,14
4	18,28	9,58	8,41	8,58	9,25	10,19	10,57
5	20,56	22,31	20,64	17,49	16,23	17,41	19,24
6	16,32	17,32	17,41	17,54	16,29	17,25	19,29
7	14,32	12,23	16,48	18,31	19,27	20,29	20,18
8	19,45	18,34	18,40	20,24	21,24	21,43	20,17
9	21,08	23,24	18,23	20,15	20,48	20,19	19,58
10	22,29	23,15	19,04	19,47	20,23	20,18	21,81

Tabla A - 35. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 1.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	21,37	21,33	20,69	17,70	16,84	17,19	18,9
2	10,96	10,02	9,72	10,68	12,20	11,21	10,99
3	21,03	17,46	16,12	15,98	16,88	16,04	13,73
4	8,27	6,16	5,03	13,76	19,60	12,43	15,30
5	23,22	20,22	22,60	24,08	24,58	22,32	25,60
6	22,16	17,86	17,54	20,99	22,38	23,35	23,00
7	21,20	20,69	20,86	21,29	21,16	21,12	21,50
8	20,90	16,16	11,27	12,40	14,68	17,70	21,24
9	12,84	10,87	10,26	12,04	13,62	16,31	19,60
10	17,42	18,86	23,76	23,53	23,99	23,76	24,44

Tabla A - 36. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 2.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	20,77	20,77	20,22	18,02	17,58	16,87	18,36
2	10,87	10,41	10,29	10,47	11,05	10,66	10,40
3	20,27	16,42	15,93	15,86	16,42	15,58	13,20
4	10,87	6,74	5,41	14,54	19,85	15,18	14,77
5	22,46	19,93	22,24	23,90	24,58	22,14	25,42
6	20,82	17,62	17,06	21,12	22,86	22,87	22,52
7	20,60	20,01	21,07	20,99	20,86	20,82	21,20
8	19,85	16,77	10,14	12,40	14,08	18,64	20,59
9	12,94	11,33	9,87	11,52	12,97	17,05	18,98
10	17,58	19,35	23,67	23,31	23,67	23,95	24,39

Tabla A - 37. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 3.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	19,60	20,31	19,85	17,82	17,50	17,22	18,58
2	11,33	11,08	10,05	10,23	11,94	10,23	11,61
3	19,23	16,69	16,23	15,86	16,69	15,92	14,12
4	11,21	6,48	5,26	13,28	19,56	18,34	15,23
5	21,50	19,72	21,98	23,90	24,53	23,56	24,65
6	20,44	17,50	17,54	21,29	23,09	23,19	23,47
7	19,64	19,56	20,22	21,24	21,46	21,76	22,07
8	20,31	16,57	11,94	12,63	13,80	14,45	19,67
9	13,00	10,93	9,46	11,11	12,20	11,78	12,71
10	17,58	19,56	23,76	23,40	23,90	23,29	23,83

Tabla A - 38. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 4.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	19,81	20,99	20,22	17,86	17,86	17,51	19,02
2	11,27	9,90	9,23	10,23	10,23	10,45	11,82
3	20,14	16,80	17,70	17,15	17,15	15,99	14,50
4	11,65	6,94	5,66	14,04	14,04	18,41	15,31
5	22,68	20,32	22,46	24,08	24,08	23,81	24,72
6	20,60	17,98	18,90	21,72	21,72	23,41	23,54
7	19,85	20,27	21,42	21,37	21,37	21,83	22,12
8	20,65	16,73	11,40	12,50	12,50	14,61	19,71
9	15,82	11,81	10,14	11,02	11,02	11,90	12,75
10	18,14	20,48	24,08	23,58	23,58	21,42	28,90

Tabla A - 39. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 5.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	20,21	21,01	20,44	18,32	18,59	18,51	19,74
2	13,10	10,71	10,48	11,72	12,79	13,94	14,42
3	20,37	17,10	17,74	17,67	17,47	17,05	16,55
4	14,535	7,565	6,11	14,54	17,80	19,38	17,73
5	22,89	20,46	22,73	24,17	24,40	24,71	25,32
6	21,08	18,24	19,15	21,90	22,43	23,47	23,64
7	19,93	20,36	21,04	21,14	21,16	21,57	21,66
8	20,63	16,65	11,90	12,75	13,43	14,85	17,94
9	16,94	12,34	10,43	11,53	12,67	12,90	13,73
10	20,99	22,37	24,22	23,72	23,83	23,22	27,20

Tabla A - 40. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 6.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	20,60	21,03	20,65	18,78	19,31	19,50	20,45
2	14,93	11,52	11,72	13,21	15,34	17,43	17,02
3	20,60	17,39	17,78	18,18	17,78	18,10	18,60
4	17,42	8,19	6,55	15,04	21,55	20,35	20,15
5	23,09	20,60	23,00	24,26	24,72	25,60	25,91
6	21,55	18,50	19,39	22,07	23,13	23,52	23,74
7	20,01	20,44	20,65	20,90	20,94	21,30	21,20
8	20,60	16,57	12,40	13,00	14,36	15,09	16,17
9	18,06	12,87	10,71	12,04	14,32	13,90	14,70
10	23,85	24,26	24,35	23,85	24,08	25,02	25,50

Tabla A - 41. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 7.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	21,24	21,12	20,33	18,58	18,34	19,03	19,40
2	15,48	21,4	15,08	15,45	16,96	17,34	17,46
3	20,60	17,78	17,78	16,06	17,78	17,80	18,34
4	16,84	8,00	6,29	14,93	21,16	20,14	20,00
5	23,80	21,12	23,40	24,40	24,95	23,61	23,40
6	21,33	18,30	19,15	22,11	23,17	22,23	22,18
7	20,52	20,60	21,37	20,99	21,94	22,00	22,24
8	20,56	16,92	12,80	13,41	15,74	15,81	16,23
9	16,80	12,34	9,96	12,40	14,90	13,12	13,41
10	17,94	20,69	24,12	23,85	24,08	24,21	24,57

Tabla A - 42. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 8.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	17,76	20,65	19,97	18,34	18,02	18,61	19,31
2	17,04	11,85	14,39	14,93	16,35	16,91	17,81
3	20,10	17,39	17,40	17,45	17,70	17,70	20,40
4	16,16	7,63	6,25	15,56	20,56	20,17	20,20
5	18,75	18,50	19,45	17,60	16,50	20,15	20,69
6	19,20	17,75	17,40	18,16	19,51	18,77	17,36
7	19,45	19,76	20,44	21,12	21,07	18,17	18,50
8	19,72	16,54	12,24	12,94	15,48	16,16	15,18
9	17,16	17,36	18,45	19,26	20,30	20,95	19,16
10	16,46	19,89	23,62	23,40	23,40	24,35	25,50

Tabla A - 43. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca La Fátima, semana 9.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	17,98	20,45	18,76	18,25	18,06	18,05	18,98
2	17,06	11,6	14,15	13,78	16,33	15,83	17,95
3	20,15	17,55	17,35	17,05	17,05	16,15	18,11
4	15,79	7,36	6,05	14,96	19,96	18,88	17,98
5	18,20	18,15	19,25	16,96	17,05	18,07	18,90
6	19,40	17,55	17,25	21,06	19,87	17,18	17,16
7	19,09	19,46	19,78	20,83	19,96	17,98	17,09
8	19,56	16,36	16,65	12,16	15,16	14,98	14,92
9	17,65	17,05	19,50	19,46	20,14	19,2	18,98

Tabla A - 44. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 1.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	24,41	10,73	12,10	9,90	11,98	12,19	13,90
2	20,79	17,29	14,59	6,41	10,99	11,21	10,99
3	23,79	17,97	10,07	6,89	9,72	10,04	11,73
4	25,78	25,00	19,55	13,56	14,03	12,43	15,30
5	18,94	16,58	9,91	10,45	14,01	12,32	15,60
6	12,00	14,79	8,93	10,10	12,13	13,35	13,04
7	22,79	21,11	14,01	19,32	20,36	21,12	21,50
8	14,31	20,68	14,09	9,94	9,89	10,70	11,24
9	19,42	18,09	13,61	13,07	13,89	14,31	15,60
10	18,67	15,55	13,73	13,42	11,39	13,76	14,44

Tabla A - 45. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 2.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	24,86	10,6	12,01	9,81	11,88	16,87	18,36
2	21,94	17,04	14,47	5,71	10,93	10,66	10,40
3	23,00	17,86	9,96	6,6	9,61	15,58	13,20
4	25,65	24,90	19,43	13,48	13,90	12,18	14,77
5	18,82	16,31	9,35	10,50	13,94	12,14	15,42
6	11,92	14,65	8,46	10,05	12,07	12,87	12,52
7	22,11	20,31	13,76	19,23	20,27	20,82	21,20
8	14,01	19,93	15,45	9,87	9,75	11,64	12,59
9	19,27	17,42	13,55	13,00	13,73	17,05	18,98
10	18,46	15,41	13,69	13,21	11,24	13,95	14,3

Tabla A - 46. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 3.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	23,51	19,44	12,57	11,14	10,8	15,45	17,43
2	23,71	19,60	12,34	10,14	12,37	10,24	11,67
3	22,85	19,17	12,46	8,78	11,67	16,08	15,65
4	22,46	16,84	10,17	6,65	10,29	13,71	14,24
5	21,07	16,24	12,85	10,70	11,33	10,09	11,43
6	18,94	15,26	15,71	17,27	12,07	11,59	12,78
7	23,21	19,88	14,45	20,23	20,87	20,34	21,09
8	14,78	21,04	16,23	10,57	10,61	11,76	12,56
9	12,01	19,89	15,74	9,09	9,87	17,56	18,31
10	20,99	20,06	13,73	19,56	20,69	20,13	19,34

Tabla A - 47. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 4.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	24,12	19,58	12,78	11,32	11,06	15,68	17,59
2	24,6	19,11	12,67	10,77	13,60	10,71	11,94
3	22,55	18,06	17,62	5,56	8,54	16,34	15,82
4	22,91	17,54	11,56	14,08	17,15	13,85	14,55
5	24,03	24,95	19,85	15,45	19,97	10,28	11,69
6	19,11	15,26	17,31	22,24	21,03	12,20	12,90
7	19,11	17,40	9,32	11,15	14,75	20,64	21,39
8	14,98	21,15	16,41	10,81	11,82	11,89	12,67
9	12,61	20,31	15,85	10,25	10,29	17,71	18,56
10	23,09	20,48	14,25	20,48	20,48	20,47	19,68

Tabla A - 48. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 5.

PUNTOS	10	20	30	40	50	60	70
1	24,645	19,88	13,96	11,71	11,98	17,94	19,55
2	24,34	19,29	12,94	10,68	13,58	12,71	13,87
3	22,60	18,06	17,6	5,67	8,79	13,62	13,79
4	22,62	17,54	11,61	14,19	17,81	16,70	17,35
5	24,37	24,05	20,51	17,03	19,44	15,53	15,94
6	21,10	19,02	18,74	20,91	20,83	17,00	17,90
7	20,63	19,48	14,71	14,68	17,65	21,37	22,42
8	16,32	19,65	13,26	11,09	12,35	15,40	16,19
9	12,96	20,08	16,06	10,14	10,25	14,56	15,68
10	23,47	20,74	14,68	20,02	20,91	21,29	21,39

Tabla A - 49. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 6.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	25,17	20,18	15,14	12,10	12,90	20,20	21,50
2	24,08	19,47	13,21	10,59	13,55	14,70	15,80
3	22,64	18,06	17,58	5,77	9,04	10,90	11,75
4	22,33	17,54	11,65	14,29	18,46	19,54	20,15
5	24,70	23,15	21,17	18,60	18,91	20,78	20,19
6	23,09	22,77	20,16	19,58	20,62	21,80	22,90
7	22,15	21,55	20,09	18,20	20,54	22,10	23,45
8	17,66	18,14	10,11	11,37	12,87	18,90	19,70
9	13,31	19,85	16,27	10,02	10,20	11,40	12,80
10	23,85	20,99	14,68	19,56	21,33	22,10	23,09

Tabla A - 50. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 7.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	22,41	21,32	19,38	19,45	21,56	22,35	23,07
2	23,15	21,34	20,89	18,71	20,14	21,76	22,46
3	24,40	18,38	12,11	16,38	19,19	19,57	20,07
4	25,31	23,41	15,23	15,48	18,23	19,46	20,50
5	24,81	23,12	18,59	18,23	19,32	20,22	20,81
6	24,25	23,91	20,49	19,36	19,67	20,51	20,71
7	24,40	18,38	12,11	16,38	19,19	21,21	21,75
8	20,23	20,48	15,32	16,34	18,68	21,71	22,04
9	12,20	19,85	16,08	10,11	10,41	12,15	13,18
10	23,99	21,33	15,19	20,06	21,76	20,80	21,71

Tabla A - 51. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 8.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	21,30	21,67	18,70	18,95	19,71	21,76	21,00
2	22,54	20,17	16,44	17,70	18,40	20,15	19,08
3	23,08	22,46	15,35	16,65	17,55	18,56	18,71
4	24,21	18,62	12,34	15,74	18,26	19,30	19,40
5	20,15	18,25	18,51	19,52	20,47	20,71	20,12
6	21,16	19,44	18,76	19,72	20,07	21,15	19,10
7	20,61	19,11	19,22	19,44	20,08	19,13	19,70
8	18,50	18,14	10,32	11,98	13,28	14,14	17,18
9	11,05	19,02	16,16	10,14	10,20	11,16	12,17
10	23,35	20,90	14,72	19,39	21,20	21,08	20,16

Tabla A - 52. Contenido de humedad del suelo (%), medido con sonda FDR en el perfil de 70 cm finca El Carmen, semana 9.

PUNTOS	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1	20,14	21,80	19,46	18,29	19,47	21,23	20,15
2	21,35	20,20	18,34	17,32	18,50	19,19	20,67
3	23,65	22,41	15,23	16,19	17,21	18,43	19,07
4	24,98	23,31	13,27	15,49	18,57	19,45	20,04
5	21,49	19,23	16,23	18,41	19,19	20,04	20,00
6	22,19	20,24	18,28	19,46	20,24	21,16	20,24
7	21,10	20,48	18,47	19,23	20,45	19,32	18,76
8	19,73	20,24	12,59	12,30	15,23	14,90	16,49
9	12,78	16,39	16,56	11,39	12,24	12,34	11,32
10	23,70	21,76	15,34	18,41	22,24	20,28	19,34

Tabla A - 53. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego subfoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

MUESTRAS	COD. CAMPO	FINCA	% SATURACION	% HUMEDAD (1/10 atm)	% HUMEDAD (1/3 atm)	% HUMEDAD (15 atm)	D. APARENTE (g.cm ⁻³)
					CC	PMP	
1	SBFCC	El Cisne	35,29	32,07	30,39	11,00	1,55
2	SBFCC	El Cisne	35,14	28,90	26,54	17,32	1,57
3	SBFCC	El Cisne	38,54	33,47	32,94	18,02	1,68
4	SBFCC	El Cisne	32,30	28,41	27,80	13,37	1,64
5	SBFCC	El Cisne	31,19	27,59	26,36	20,31	1,70
6	SBFCC	El Cisne	31,95	28,27	25,86	11,31	1,66
7	SBFCC	El Cisne	37,79	33,95	29,35	29,26	1,56
8	SBFCC	El Cisne	39,81	33,33	31,26	12,37	1,50
9	SBFCC	El Cisne	46,98	28,07	27,92	11,90	1,34
PROMEDIO			36,55	30,45	28,71	16,10	1,58

Tabla A - 54. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego suprafoliar con cobertura vegetal, Finca El Cisne.

MUESTRAS	COD. CAMPO	FINCA	% SATURACION	% HUMEDAD (1/10 atm)	% HUMEDAD (1/3 atm)	% HUMEDAD (15 atm)	D. APARENTE (g.cm ⁻³)
					CC	PMP	
1	SPFCC	El Cisne	38,10	34,01	33,81	32,53	1,54
2	SPFCC	El Cisne	42,39	36,82	35,69	22,94	1,33
3	SPFCC	El Cisne	29,55	26,04	24,28	14,07	1,71
4	SPFCC	El Cisne	36,29	32,92	32,08	14,04	1,55
5	SPFCC	El Cisne	42,02	37,62	37,47	28,48	1,41
6	SPFCC	El Cisne	37,08	30,95	29,73	18,71	1,56
7	SPFCC	El Cisne	30,69	28,82	27,74	17,68	1,66
8	SPFCC	El Cisne	39,93	34,15	32,71	12,95	1,39
9	SPFCC	El Cisne	43,90	32,76	31,91	26,67	1,40
PROMEDIO			37,77	32,68	31,71	20,90	1,51

Tabla A - 55. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego subfoliar sin cobertura vegetal, Finca La Fátima.

MUESTRAS	COD. CAMPO	PROCEDENCIA	% SATURACION	% HUMEDAD (1/10 atm)	% HUMEDAD (1/3 atm)	% HUMEDAD (15 atm)	D. APARENTE (g.cm ⁻³)
					CC	PMP	
1	SBFSC	La Fátima	33,95	18,91	17,32	13,30	1,58
2	SBFSC	La Fátima	36,00	30,69	30,42	14,69	1,49
3	SBFSC	La Fátima	41,36	25,21	24,02	23,28	1,42
4	SBFSC	La Fátima	38,80	33,85	32,66	17,89	1,43
5	SBFSC	La Fátima	32,10	29,29	28,93	17,24	1,64
6	SBFSC	La Fátima	44,16	41,10	39,60	18,68	1,40
7	SBFSC	La Fátima	36,93	33,31	32,61	38,64	1,58
8	SBFSC	La Fátima	31,20	26,46	26,40	18,32	1,64
9	SBFSC	La Fátima	32,57	29,19	28,86	16,22	1,54
PROMEDIO			36,34	29,78	28,98	19,81	1,52

Tabla A - 56. Base de datos para la determinación de la curva de retención de humedad, riego suprafoliar sin cobertura vegetal, Finca El Carmen.

COD. LABORATOR	COD. CAMPO	PROCEDENCIA	% SATURACION	% HUMEDAD (1/10 atm)	% HUMEDAD (1/3 atm)	% HUMEDAD (15 atm)	D. APARENTE (g.cm ⁻³)
					CC	PMP	
1	SPFSC	El Carmen	38,10	33,53	33,46	13,25	1,53
2	SPFSC	El Carmen	47,86	40,14	37,43	35,71	1,33
3	SPFSC	El Carmen	32,89	30,45	28,80	8,70	1,64
4	SPFSC	El Carmen	37,49	35,93	31,73	18,13	1,48
5	SPFSC	El Carmen	34,46	29,74	29,67	15,15	1,57
6	SPFSC	El Carmen	35,93	33,29	31,84	19,00	1,51
7	SPFSC	El Carmen	33,48	30,92	28,91	10,55	1,79
8	SPFSC	El Carmen	29,78	28,69	28,63	12,32	1,65
9	SPFSC	El Carmen	31,12	28,79	28,59	25,41	1,50
PROMEDIO			35,68	32,39	31,01	17,58	1,56

Tabla A - 57. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm⁻²), riego subfoliar con cobertura Finca el Cisne.

Densidad Aparente (g.cm ⁻³)	% Saturación	% Humedad a 1/10	Resistencia a la penetración 1/10 (Kg.cm ⁻²)	% Humedad a 1/3	Resistencia a la penetración 1/3 (Kg.cm ⁻²)	P.M.P (% Humedad a 15 atm.)	Resistencia a la penetración 15 atm (kg.cm ⁻²)
1,1	60,74	43,32	0,10	41,25	0,10	24,98	1,50
1,2	58,77	43,75	0,10	42,15	0,10	24,16	2,00
1,3	52,58	42,50	0,30	41,36	0,35	24,36	2,25
1,4	49,19	41,37	0,50	40,10	0,50	24,98	2,75
1,5	45,51	39,83	0,75	38,51	0,85	23,37	3,75

Tabla A - 58. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm⁻²), riego suprafoliar con cobertura Finca el Cisne.

Densidad Aparente	% Saturación	% Humedad a 1/10	Resistencia a la penetración 1/10 (kg.cm ⁻²)	% Humedad a 1/3	Resistencia a la penetración 1/3 (kg.cm ⁻²)	P.M.P (% Humedad a 15 atm.)	Resistencia a la penetración 15 atm (kg.cm ⁻²)
1,1	63,27	45,58	0,10	44,49	0,15	29,36	1,75
1,2	57,76	45,44	0,20	44,21	0,35	26,55	2,25
1,3	51,82	44,07	0,65	42,40	0,75	25,30	2,50
1,4	47,17	41,71	0,75	40,23	1,00	31,18	2,75
1,5	45,18	40,70	1,25	39,58	1,35	28,60	3,75

Tabla A - 59. Datos para la determinación del IHO: Porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego suprafoliar sin cobertura Finca el Carmen.

Densidad Aparente	% Saturación	% Humedad a 1/10	Resistencia a la penetración 1/10 (kg.cm ⁻²)	% Humedad a 1/3	Resistencia a la penetración 1/3 (kg.cm ⁻²)	P.M.P (% Humedad a 15 atm.)	Resistencia a la penetración 15 atm (kg.cm ⁻²)
1,1	59,16	49,60	0,00	31,64	0,50	23,88	1,25
1,2	54,12	47,84	0,10	32,57	0,65	23,79	1,50
1,3	50,23	45,17	0,20	32,02	1,10	23,22	1,75
1,4	45,75	42,16	0,75	31,34	1,40	24,56	2,50
1,5	44,08	40,99	0,85	33,75	1,50	23,21	3,25

Tabla A - 60. Datos para la determinación del IHO: porcentaje de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración (Kg.cm-2), riego subfoliar sin cobertura Finca La Fátima.

Densidad Aparente	% Saturación	% Humedad a 1/10	Resistencia a la penetración 1/10 (kg.cm ⁻²)	% Humedad a 1/3	Resistencia a la penetración 1/3 (kg.cm ⁻²)	P.M.P (% Humedad a 15 atm.)	Resistencia a la penetración 15 atm (kg.cm ⁻²)
1,1	59,31	49,28	0,00	40,33	0,35	27,90	2,50
1,2	55,56	48,05	0,10	39,69	0,50	27,62	2,50
1,3	51,94	46,16	0,25	38,86	0,75	28,81	2,50
1,4	48,12	43,93	0,65	38,11	1,00	28,95	2,75
1,5	46,25	42,52	0,75	37,94	1,25	28,68	2,85

Tabla A - 61. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Cisne, con cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	Oct-20	20-30	30-40	40-50
M1	810,50	947,60	789,00	636,00	578,00
M2	793,00	965,30	1249,00	846,00	914,00
M3	914,00	818,36	732,00	412,00	442,00
M4	828,00	1032,20	734,02	344,00	462,00
M5	569,50	946,78	799,23	654,00	692,00
M6	812,30	1188,91	1025,30	610,00	953,00
M7	793,00	946,12	864,29	567,50	845,00
M8	863,20	938,23	965,24	716,50	625,00
M9	741,50	998,23	822,69	812,00	501,00
SUMA	221,00	204,20	209,68	199,22	215,62
PROMEDIO	791,67	975,75	886,75	622,00	668,00

Tabla A - 62. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Cisne con cobertura vegetal y sistema de riego suprafoliar.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	879,00	1137,00	1102,00	723,00	569,00
M2	1068,00	929,00	1033,00	861,00	828,00
M3	795,00	1257,00	1050,00	741,00	741,50
M4	965,00	1138,98	895,00	705,00	794,00
M5	171,00	901,50	799,50	654,00	534,50
M6	913,00	1257,00	914,20	705,00	534,50
M7	568,00	1205,00	1031,00	791,00	690,00
M8	827,00	1015,00	724,35	638,31	845,00
M9	827,00	932,50	809,00	486,68	465,50
SUMA	7013,00	9772,98	8358,05	6304,99	6002,00
PROMEDIO	779,22	1085,89	928,67	700,55	666,89

Tabla A - 63. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca La Fátima, sin cobertura vegetal y sistema de riego subfoliar.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	1636,00	1550,00	1551,00	1672,00	1275,00
M2	757,00	895,00	653,00	655,00	758,00
M3	464,00	670,00	601,00	568,50	482,00
M4	445,00	946,00	740,00	585,00	620,00
M5	929,00	876,00	791,00	999,40	533,40
M6	601,00	915,00	567,00	620,00	687,00
M7	775,00	827,00	791,00	602,50	464,00
M8	779,00	843,00	657,50	482,00	427,00
M9	791,00	792,90	1171,00	1201,03	862,00
SUMA	7177,00	8314,90	7522,50	7385,43	6108,40
PROMEDIO	797,44	923,88	835,83	820,60	678,71

Tabla A - 64. Resistencia a la penetración del suelo (Kpa), en finca El Carmen sin cobertura vegetal, bajo sistema de riego suprafoliar.

Muestras	Profundidad del suelo (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
M1	999,00	1084,00	1567,00	1207,00	1276,50
M2	758,00	947,00	1015,00	844,95	965,00
M3	346,00	620,00	706,00	740,56	1120,90
M4	846,00	861,00	895,00	896,00	792,50
M5	343,00	896,00	861,00	913,95	965,57
M6	775,00	1310,00	1189,00	1068,85	1379,20
M7	739,00	948,00	801,00	585,56	672,13
M8	279,00	641,55	1034,00	1138,00	1051,36
M9	392,60	637,00	412,03	328,00	706,77
SUMA	5477,60	7944,55	8480,03	7722,87	8929,93
PROMEDIO	608,62	882,73	942,23	858,10	992,21

Tabla A - 65. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento testigo, en finca con riego subfoliar

Contenido de humedad (%)	11,09	15,47	17,25	20,16	21,96
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,52	1,61	1,60	1,58	1,55

Tabla A - 66. Prueba Proctor, para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con sulfato de calcio, en finca con riego subfoliar

	9,65	14,36	18,63	23,59	32,69
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,49	1,58	1,60	1,57	1,30

Tabla A - 67. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con roturación, en finca con riego subfoliar.

Contenido de humedad (%)	11,09	15,47	17,41	22,44	24,98
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,52	1,72	1,71	1,57	1,51

Tabla A - 68. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con cobertura vegetal, en finca con riego subfoliar.

Contenido de humedad (%)	13,58	15,61	20,06	24,97	28,64
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,57	1,63	1,59	1,53	1,41

Tabla A - 69. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento testigo, en finca con riego suprafoliar.

Contenido de humedad (%)	4,35	7,31	11,32	16,82	20,80
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,50	1,59	1,69	1,73	1,61

Tabla A - 70. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con sulfato de calcio, en finca con riego suprafoliar.

Contenido de humedad (%)	9,47	12,72	17,51	23,41	31,64
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,50	1,58	1,66	1,62	1,41

Tabla A - 71. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con roturación, en finca con riego suprafoliar.

Contenido de humedad (%)	13,39	16,91	19,68	23,29	25,46
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,66	1,74	1,73	1,63	1,55

Tabla A - 72. Compactación inducida (Prueba Proctor), para obtener la densidad de suelo crítica y contenido de humedad óptimo, en el tratamiento con cobertura vegetal, en finca con riego suprafoliar.

Contenido de humedad (%)	12,20	16,53	20,08	24,99	28,66
Densidad seca (g.cm ⁻³)	1,48	1,59	1,61	1,55	1,43

Tabla A - 73. Infiltración instantánea de los suelos (cm.min⁻¹), finca El Cisne con riego subfoliar y cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv.est.	CV%
1	72,00	144,00	48,00	42,00	76,50	46,83	61,22
2	45,00	78,00	36,00	42,00	50,25	18,87	37,56
3	36,00	60,00	36,00	40,00	43,00	11,49	26,72
4	33,00	51,00	34,50	39,00	39,38	8,16	20,72
5	32,40	49,20	32,40	37,20	37,80	7,93	20,98
6	32,00	49,00	32,00	37,00	37,50	8,02	21,39
8	30,75	47,25	28,50	33,75	35,06	8,40	23,97
10	30,00	46,80	27,00	30,60	33,60	8,94	26,61
15	26,00	33,60	20,80	22,80	25,80	5,62	21,80
20	24,00	26,40	18,60	18,90	21,98	3,85	17,53
25	20,16	21,84	16,80	16,80	18,90	2,52	13,33
30	17,60	20,00	15,60	15,20	17,10	2,20	12,87
40	13,50	15,30	12,75	12,45	13,50	1,28	9,47
50	11,04	13,44	11,16	10,80	11,61	1,23	10,59
60	9,80	12,20	10,00	9,70	10,43	1,19	11,41
80	7,58	9,98	7,88	8,10	8,38	1,08	12,93
100	6,90	8,40	6,60	6,84	7,19	0,82	11,42
120	6,40	7,25	5,70	6,05	6,35	0,66	10,47

Tabla A - 74. Infiltración acumulada de los suelos (cm.min⁻¹), finca El Cisne con riego subfoliar y cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv.est.	CV%
1	1,20	2,40	0,80	0,70	1,28	0,78	61,22
2	1,50	2,60	1,20	1,40	1,68	0,63	37,56
3	1,80	3,00	1,80	2,00	2,15	0,57	26,72
4	2,20	3,40	2,30	2,60	2,63	0,54	20,72
5	2,70	4,10	2,70	3,10	3,15	0,66	20,98
6	3,20	4,90	3,20	3,70	3,75	0,80	21,39
8	4,10	6,30	3,80	4,50	4,68	1,12	23,97
10	5,00	7,80	4,50	5,10	5,60	1,49	26,61
15	6,50	8,40	5,20	5,70	6,45	1,41	21,80
20	8,00	8,80	6,20	6,30	7,33	1,28	17,53
25	8,40	9,10	7,00	7,00	7,88	1,05	13,33
30	8,80	10,00	7,80	7,60	8,55	1,10	12,87
40	9,00	10,20	8,50	8,30	9,00	0,85	9,47
50	9,20	11,20	9,30	9,00	9,68	1,02	10,59
60	9,80	12,20	10,00	9,70	10,43	1,19	11,41
80	10,10	13,30	10,50	10,80	11,18	1,45	12,93
100	11,50	14,00	11,00	11,40	11,98	1,37	11,42
120	12,80	14,50	11,40	12,10	12,70	1,33	10,47

Tabla A - 75. Infiltración instantánea de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca El Cisne con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv. est.	CV%
1	75,00	18,00	132,00	72,00	74,25	46,56	62,71
2	75,00	18,00	78,00	45,00	54,00	28,25	52,31
3	71,00	14,00	60,00	36,00	45,25	25,45	56,24
4	59,55	13,50	52,50	33,00	39,64	20,73	52,30
5	51,60	12,00	50,40	32,40	36,60	18,60	50,83
6	50,00	11,00	55,00	33,00	37,25	19,87	53,35
8	46,95	9,75	48,00	33,00	34,43	17,81	51,75
10	37,68	9,00	45,00	32,40	31,02	15,56	50,17
15	32,00	8,40	32,80	26,00	24,80	11,35	45,75
20	25,02	7,20	27,00	21,00	20,06	8,93	44,51
25	20,38	6,96	23,04	18,00	17,09	7,06	41,32
30	18,00	6,80	20,40	16,00	15,30	5,95	38,86
40	14,40	6,00	16,65	12,75	12,45	4,59	36,85
50	12,06	5,04	14,40	10,80	10,58	3,98	37,64
60	10,69	5,30	12,80	9,50	9,57	3,16	32,99
80	8,12	4,80	10,88	7,58	7,84	2,49	31,75
100	6,56	4,50	9,30	6,90	6,82	1,97	28,86
120	5,55	4,20	8,40	6,40	6,14	1,76	28,67

Tabla A - 76. Infiltración acumulada de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca El Cisne con riego suprafoliar con cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv. est.	CV%
1	1,25	0,30	2,20	1,20	1,24	0,78	62,71
2	2,50	0,60	2,60	1,50	1,80	0,94	52,31
3	3,55	0,70	3,00	1,80	2,26	1,27	56,24
4	3,97	0,90	3,50	2,20	2,64	1,38	52,30
5	4,30	1,00	4,20	2,70	3,05	1,55	50,83
6	5,00	1,10	5,50	3,30	3,73	1,99	53,35
8	6,26	1,30	6,40	4,40	4,59	2,38	51,75
10	6,28	1,50	7,50	5,40	5,17	2,59	50,17
15	8,00	2,10	8,20	6,50	6,20	2,84	45,75
20	8,34	2,40	9,00	7,00	6,69	2,98	44,51
25	8,49	2,90	9,60	7,50	7,12	2,94	41,32
30	9,00	3,40	10,20	8,00	7,65	2,97	38,86
40	9,60	4,00	11,10	8,50	8,30	3,06	36,85
50	10,05	4,20	12,00	9,00	8,81	3,31	37,64
60	10,69	5,30	12,80	9,50	9,57	3,16	32,99
80	10,83	6,40	14,50	10,10	10,46	3,32	31,75
100	10,94	7,50	15,50	11,50	11,36	3,28	28,86
120	11,10	8,40	16,80	12,80	12,28	3,52	28,67

Tabla A - 77. Infiltración instantánea de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca La Fátima con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv. est.	CV%
1	84,00	120,00	60,00	36,00	75,00	35,83	47,78
2	83,40	117,00	54,00	30,00	71,10	37,59	52,87
3	78,00	112,00	52,00	26,00	67,00	36,75	54,85
4	74,25	106,50	43,50	24,00	62,06	36,13	58,22
5	64,44	93,60	36,00	22,80	54,21	31,49	58,08
6	58,50	85,00	34,00	21,00	49,63	28,25	56,92
8	53,93	72,75	27,75	20,25	43,67	24,17	55,35
10	45,96	65,40	23,40	18,60	38,34	21,63	56,41
15	30,72	44,00	16,00	18,00	27,18	12,97	47,72
20	28,20	34,50	12,00	15,60	22,58	10,56	46,76
25	23,38	27,84	9,84	15,12	19,04	8,09	42,47
30	19,78	24,40	8,60	14,60	16,85	6,80	40,37
40	15,60	19,20	6,60	13,95	13,84	5,30	38,30
50	13,20	15,48	5,40	12,36	11,61	4,34	37,42
60	11,45	14,00	4,70	10,70	10,21	3,94	38,55
80	9,068	10,88	3,68	9,60	8,30	3,18	38,27
100	7,34	9,66	3,00	8,16	7,04	2,86	40,62
120	6,17	8,85	2,55	7,53	6,27	2,71	43,24

Tabla A - 78. Infiltración acumulada de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca La Fátima con riego subfoliar y sin cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv. est.	CV%
1	1,40	2,00	1,00	0,60	1,25	0,60	47,78
2	2,78	3,90	1,80	1,00	2,37	1,25	52,87
3	3,90	5,60	2,60	1,30	3,35	1,84	54,85
4	4,95	7,10	2,90	1,60	4,14	2,41	58,22
5	5,37	7,80	3,00	1,90	4,52	2,62	58,09
6	5,85	8,50	3,40	2,10	4,96	2,83	56,92
8	7,19	9,70	3,70	2,70	5,82	3,22	55,35
10	7,66	10,90	3,90	3,10	6,39	3,60	56,41
15	7,68	11,00	4,00	4,50	6,80	3,24	47,72
20	9,40	11,50	4,00	5,20	7,53	3,52	46,76
25	9,74	11,60	4,10	6,30	7,94	3,37	42,47
30	9,89	12,20	4,30	7,30	8,42	3,40	40,37
40	10,40	12,80	4,40	9,30	9,23	3,53	38,30
50	11,00	12,90	4,50	10,30	9,68	3,62	37,42
60	11,45	14,00	4,70	10,70	10,21	3,94	38,55
80	12,09	14,50	4,90	12,80	11,07	4,24	38,27
100	12,23	16,10	5,00	13,60	11,73	4,77	40,62
120	12,34	17,70	5,10	15,05	12,55	5,43	43,24

Tabla A - 79. Infiltración instantánea de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) finca El Carmen con riego suprafoliar sin cobertura vegetal.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv.est.	CV%
1	12,00	12,00	18,00	24,00	16,50	5,74	34,82
2	9,00	9,00	15,00	21,00	13,50	5,74	42,55
3	8,00	8,00	14,00	20,00	12,50	5,74	45,96
4	7,50	6,00	12,00	18,00	10,88	5,39	49,57
5	7,20	6,00	10,80	18,00	10,50	5,40	51,43
6	7,00	6,00	10,00	17,00	10,00	4,97	49,67
8	6,00	6,00	8,25	15,00	8,81	4,26	48,33
10	5,40	5,40	7,20	14,40	8,10	4,28	52,90
15	4,40	4,80	5,20	11,20	6,40	3,22	50,26
20	3,90	4,20	5,10	10,20	5,85	2,94	50,33
25	3,60	3,84	4,56	9,60	5,40	2,83	52,40
30	3,20	3,40	4,00	8,40	4,75	2,46	51,73
40	2,70	2,70	3,15	6,60	3,79	1,89	49,82
50	2,64	2,64	3,00	5,40	3,42	1,33	38,91
60	2,20	2,20	2,60	4,70	2,93	1,20	40,97
80	1,80	1,73	2,10	3,68	2,33	0,91	39,33
100	1,56	1,44	1,80	3,00	1,95	0,72	36,71
120	1,60	1,70	1,75	2,60	1,91	0,46	24,19

Tabla A - 80. Infiltración acumulada de los suelos ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), finca El Carmen con riego suprafoliar sin cobertura.

Tiempo (min)	R1	R2	R3	R4	Promedio	Desv.est.	CV%
1	0,20	0,20	0,30	0,40	0,28	0,09	34,82
2	0,30	0,30	0,50	0,70	0,45	0,19	42,55
3	0,40	0,40	0,70	1,00	0,63	0,29	45,96
4	0,50	0,40	0,80	1,20	0,73	0,36	49,57
5	0,60	0,50	0,90	1,50	0,88	0,45	51,43
6	0,70	0,60	1,00	1,70	1,00	0,49	49,67
8	0,80	0,80	1,10	2,00	1,18	0,57	48,33
10	0,90	0,90	1,20	2,40	1,35	0,71	52,90
15	1,10	1,20	1,30	2,80	1,60	0,80	50,26
20	1,30	1,40	1,70	3,40	1,95	0,98	50,33
25	1,50	1,60	1,90	4,00	2,25	1,189	52,40
30	1,60	1,70	2,00	4,20	2,38	1,23	51,73
40	1,80	1,80	2,10	4,40	2,53	1,26	49,82
50	2,20	2,20	2,50	4,50	2,85	1,11	38,91
60	2,20	2,20	2,60	4,70	2,93	1,20	40,97
80	2,40	2,30	2,80	4,90	3,10	1,22	39,33
100	2,60	2,40	3,00	5,00	3,25	1,19	36,71
120	3,20	3,40	3,50	5,20	3,83	0,93	24,19

Tabla A - 81. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

Promedio de intensidad pluviométrica (mm.hora ⁻¹)						
Orientación	Distancia radial (metros)	R1	R2	R3	R4	Promedio
Norte	2	6,09	5,41	7,04	5,50	6,01
	4	6,50	4,20	4,06	4,20	4,74
	6	5,48	4,06	3,38	3,70	4,16
	8	3,86	4,06	2,71	3,11	3,43
	10	5,68	4,06	2,71	3,52	3,99
Sur	2	2,44	3,79	2,03	2,48	2,68
	4	5,48	8,15	8,39	6,73	7,19
	6	4,67	4,20	3,52	3,61	4,00
	8	5,28	2,71	2,57	2,93	3,37
	10	4,47	3,92	3,38	3,43	3,80
Este	2	3,05	3,38	3,38	2,93	3,19
	4	2,23	2,71	1,89	2,03	2,22
	6	5,28	5,41	8,39	5,77	6,21
	8	6,09	4,87	5,41	4,78	5,29
	10	5,68	8,39	4,74	5,64	6,11
Oeste	2	4,26	5,14	5,14	4,38	4,73
	4	3,25	2,84	2,71	2,57	2,84
	6	2,23	4,33	2,17	2,66	2,85
	8	5,89	6,77	6,77	5,82	6,31
	10	4,26	7,44	6,50	5,91	6,38
Oeste	2	6,29	4,33	3,38	3,97	4,49
	4	4,06	0,81	2,98	2,17	2,50
	6	6,90	0,81	2,71	2,71	3,28
	8	2,64	1,08	2,57	1,80	2,02
	10	2,64	1,08	2,57	1,80	2,02

Tabla A - 82. Intensidad pluviométrica registrada en finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

Promedio de intensidad pluviométrica (mm.hora ⁻¹)						
Orientación	Distancia radial (metros)	R1	R2	R3	R4	Promedio
Norte	2	4,87	7,92	5,68	5,95	6,11
	4	4,67	4,06	6,09	6,09	5,23
	6	4,33	6,19	5,08	4,74	5,08
	8	4,53	6,5	3,65	5,41	5,02
	10	3,99	4,06	2,84	5,14	4,01
Sur	2	4,20	2,23	6,09	5,68	4,55
	4	9,54	6,09	6,29	9,47	7,85
	6	2,84	5,89	5,89	6,77	5,35
	8	2,30	6,50	5,48	6,09	5,09
	10	3,72	5,89	4,87	5,68	5,04
Este	2	3,92	5,28	3,86	2,98	4,01
	4	2,98	2,64	4,06	2,3	2,99
	6	3,72	6,50	6,09	3,11	4,86
	8	4,94	6,09	6,29	4,20	5,38
	10	9,88	2,44	5,68	3,11	5,28
Oeste	2	4,13	3,65	6,09	0,68	3,64
	4	3,38	4,47	5,68	1,89	3,86
	6	6,70	2,23	3,05	2,71	3,67
	8	4,26	5,89	5,89	6,23	5,57
	10	7,38	6,50	5,48	4,06	5,85
Oeste	2	3,05	2,03	6,09	2,17	3,33
	4	1,02	4,67	5,28	1,35	3,08
	6	1,15	4,87	4,87	2,71	3,40
	8	0,68	3,05	5,28	3,25	3,06
	10	0,68	3,05	5,28	3,25	3,06

Tabla A - 83. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

Promedio de intensidad pluviométrica (mm.hora ⁻¹)						
Orientación	Distancia radial (metros)	R1	R2	R3	R4	Promedio
NORTE	3	25,88	18,27	42,63	32,35	29,78
	6	17,05	40,19	39,59	34,10	32,73
	9	44,46	15,83	16,75	23,45	25,12
	12	10,96	37,45	41,41	32,81	30,66
	15	31,97	21,32	36,54	31,59	30,36
	18	19,49	16,75	24,36	21,24	20,46
	21	16,44	37,45	37,15	32,05	30,77
	24	78,26	19,18	22,23	35,47	38,79
	27	19,18	23,75	24,36	22,91	22,55
	30	21,32	46,28	49,33	41,57	39,62
	33	105,36	19,18	21,01	41,64	46,80
	36	15,53	24,36	24,97	22,46	21,83
	39	25,27	15,23	16,75	18,50	18,94
	42	16,14	4,26	19,79	15,00	13,80
	45	3,65	15,23	16,14	12,79	11,95
SUR	3	16,44	9,74	8,22	10,66	11,27
	6	9,14	16,75	14,62	13,78	13,57
	9	16,14	27,41	29,23	25,5	24,57
	12	28,01	27,41	28,01	27,86	27,82
	15	27,71	13,70	13,4	17,05	17,97
	18	10,66	6,09	7,61	7,99	8,09
	21	4,57	7,00	8,83	7,31	6,93
	24	4,26	10,35	12,18	9,74	9,14
	27	9,14	26,19	21,32	19,49	19,03
	30	30,45	12,18	12,18	16,75	17,89
	33	11,57	21,32	19,79	18,12	17,70
	36	19,79	15,23	15,23	16,37	16,65
	39	13,70	33,50	31,97	27,79	26,74
	42	29,54	21,92	30,45	28,09	27,50
	45	26,80	21,01	25,88	24,89	24,65
ESTE	3	12,79	18,27	36,54	26,04	23,41
	6	17,36	21,32	31,97	25,65	24,07
	9	36,85	33,5	33,50	34,33	34,54
	12	28,01	10,96	17,05	18,27	18,57
	15	1,83	9,14	32,89	19,18	15,76
	18	7,61	27,41	27,41	22,46	21,22
	21	29,54	30,45	30,45	30,22	30,17
	24	38,06	14,62	43,54	231,2	81,85
	27	12,18	38,67	38,67	32,05	30,39
	30	41,11	28,93	28,93	31,97	32,73
	33	31,97	37,76	36,54	35,70	35,49
	36	39,28	24,36	25,88	28,85	29,59
	39	24,66	21,01	21,32	22,08	22,27
	42	18,88	15,53	16,14	16,67	16,80
	45	17,36	30,45	28,62	26,26	25,67
OESTE	3	26,80	8,83	9,14	13,47	14,56
	6	5,48	15,23	16,75	13,55	12,75
	9	7,61	12,18	13,70	11,80	11,32
	12	11,27	19,79	20,10	17,81	17,24
	15	19,79	9,14	11,88	13,17	13,49
	18	9,14	8,83	12,79	10,89	10,41
	21	2,44	10,96	11,88	9,29	8,64
	24	3,96	12,48	13,70	10,96	10,28
	27	3,05	8,22	8,83	7,23	6,83
	30	3,81	11,27	12,18	9,86	9,28
	33	12,18	28,93	27,41	23,98	23,12
	36	31,06	24,97	24,36	26,19	26,64
	39	31,06	12,18	14,01	17,81	18,77
	42	9,44	6,70	8,83	8,45	8,35
	45	1,83	1,83	4,57	3,20	2,85

Tabla A - 84. Intensidad pluviométrica registrada en finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura vegetal.

Promedio de intensidad pluviométrica (mm,hora ⁻¹)						
Orientación	Distancia radial (metros)	R1	R2	R3	R4	Promedio
NORTE	3	68,51	27,56	25,88	63,95	46,48
	6	74,60	6,12	3,50	70,04	38,57
	9	82,83	30,6	37,36	66,99	54,45
	12	66,99	21,35	19,03	60,90	42,07
	15	130,94	19,82	18,57	115,71	71,26
	18	133,98	15,93	14,77	91,35	64,01
	21	51,77	10,20	10,51	60,90	33,34
	24	68,51	11,75	9,44	68,51	39,56
	27	68,51	5,33	4,57	65,47	35,97
	30	16,75	9,14	9,59	18,27	13,44
	33	18,88	27,34	29,54	18,88	23,66
	36	25,27	19,64	19,79	25,88	22,65
	39	51,77	5,18	4,42	54,81	29,04
	42	27,71	3,41	3,05	29,23	15,85
	45	15,23	4,72	4,57	14,92	9,86
SUR	3	19,79	3,41	3,35	21,01	11,89
	6	68,51	21,47	16,44	63,95	42,59
	9	22,84	6,82	9,14	23,14	15,48
	12	10,66	19,95	16,14	11,88	14,65
	15	7,00	25,88	28,01	6,70	16,90
	18	6,70	24,36	27,71	6,39	16,29
	21	6,09	12,18	10,66	6,09	8,75
	24	16,75	6,76	4,57	17,66	11,43
	27	2,44	3,05	4,26	3,05	3,20
	30	4,26	10,05	9,14	7,61	7,76
	33	4,26	29,84	30,45	7,92	18,12
	36	14,31	9,68	11,57	15,53	12,77
	39	1,52	24,82	19,79	3,05	12,29
	42	5,79	10,96	13,70	6,09	9,14
	45	5,48	30,57	29,54	5,18	17,69
ESTE	3	71,86	21,32	26,8	91,66	52,91
	6	124,85	13,70	20,10	121,8	70,11
	9	45,07	30,57	20,71	49,94	36,57
	12	35,02	6,46	10,66	30,45	20,65
	15	27,41	9,59	7,28	25,88	17,54
	18	33,50	8,83	5,79	30,15	19,56
	21	46,59	17,17	20,4	52,07	34,06
	24	55,42	10,32	6,70	54,81	31,81
	27	77,65	21,32	16,14	60,90	44,00
	30	55,72	13,76	13,55	46,59	32,41
	33	24,36	19,88	20,40	22,84	21,87
	36	6,39	6,15	6,64	9,14	7,08
	39	13,70	11,11	9,74	15,23	12,45
	42	10,96	11,27	11,57	11,57	11,34
	45	3,65	7,31	7,92	4,87	5,94
OESTE	3	54,81	10,05	10,35	58,47	33,42
	6	59,07	3,71	3,05	59,07	31,23
	9	97,44	27,25	27,71	97,44	62,46
	12	27,41	6,52	26,80	29,84	22,64
	15	33,50	9,44	5,48	34,10	20,63
	18	30,45	12,79	7,61	28,32	19,79
	21	12,18	19,34	11,27	14,92	14,43
	24	18,27	9,17	19,79	20,40	16,91
	27	21,32	3,11	9,14	26,19	14,94
	30	42,63	3,96	2,44	41,11	22,53
	33	13,09	3,53	3,96	13,09	8,42
	36	18,27	3,65	3,05	19,79	11,19
	39	30,45	16,84	3,81	31,36	20,62
	42	13,70	29,84	12,18	14,01	17,43
	45	13,70	30,64	31,06	13,40	22,20

Tabla A - 85. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad aparente del suelo (g.cm-3), en finca con riego subfoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	1,12	1,15	1,18	0,94	1,01	0,91
20	1,17	1,18	1,20	1,01	1,09	1,05
30	1,24	1,27	1,22	1,13	1,14	1,12
40	1,22	1,22	1,23	1,19	1,21	1,19
50	1,21	1,24	1,22	1,23	1,24	1,22
Suma	5,96	6,06	6,05	5,50	5,69	5,49
Promedio	1,19	1,21	1,21	1,10	1,14	1,10
Desv. Estándar	0,05	0,05	0,02	0,12	0,09	0,12
CV%	4,00	3,93	1,65	11,10	8,13	11,29

Tabla A - 86. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad aparente del suelo (g.cm-3), en finca con riego suprafoliar.

Profundidad (cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	1,10	1,13	1,11	1,04	1,01	0,94
20	1,14	1,11	1,20	1,08	1,10	1,05
30	1,23	1,22	1,24	1,15	1,14	1,16
40	1,24	1,24	1,25	1,14	1,16	1,19
50	1,25	1,26	1,22	1,19	1,24	1,19
Suma	5,96	5,96	6,02	5,6	5,65	5,53
Promedio	1,19	1,19	1,20	1,12	1,13	1,11
Desv. Estándar	0,07	0,07	0,06	0,06	0,08	0,11
CV%	5,67	5,67	4,65	5,32	7,46	9,88

Tabla A - 87. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad real del suelo (g.cm-3) en finca con riego subfoliar.

Profundidad (cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	T2R1	T2R2	T2R3	T3R1	T3R2	T3R3
10	2,54	2,59	2,47	2,59	2,46	2,57
20	2,54	2,55	2,53	2,54	2,59	2,49
30	2,37	2,41	2,40	2,54	2,47	2,57
40	2,49	2,49	2,49	2,59	2,59	2,59
50	2,44	2,54	2,39	2,59	2,61	2,58
Suma	12,38	12,58	12,28	12,85	12,72	12,80
Promedio	2,48	2,52	2,46	2,57	2,54	2,56
Desv. Estándar	0,07	0,07	0,06	0,03	0,07	0,04
CV%	2,92	2,75	2,44	1,07	2,86	1,56

Tabla A - 88. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la densidad real del suelo (g.cm-3) en finca con riego suprafoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	2,47	2,52	2,49	2,51	2,54	2,49
20	2,49	2,49	2,49	2,57	2,59	2,62
30	2,59	2,59	2,61	2,62	2,62	2,62
40	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
50	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
Suma	10,17	12,84	12,83	12,94	12,99	12,97
Promedio	2,54	2,57	2,57	2,59	2,60	2,59
Desv.Estándar	0,07	0,06	0,07	0,05	0,03	0,06
CV%	2,90	2,33	2,71	1,88	1,34	2,24

Tabla A - 89. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la materia orgánica del suelo (%) en finca con riego subfoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	2,27	2,41	2,14	2,79	2,79	2,86
20	1,70	1,74	1,94	1,48	1,64	1,58
30	0,13	0,19	0,27	1,34	1,38	1,39
40	0,00	0,00	0,00	0,84	0,87	0,92
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	4,10	4,34	4,35	6,45	6,68	6,75
Promedio	0,82	0,87	0,87	1,29	1,34	1,35
Desv. Estándar	1,08	1,13	1,08	1,02	1,03	1,04
CV%	132,16	130,15	123,68	79,01	76,79	77,18

Tabla A - 90. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la materia orgánica del suelo (%) en finca con riego suprafoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	2,00	2,04	1,94	2,70	2,57	2,74
20	0,84	0,85	0,83	1,57	1,64	1,51
30	0,00	0,00	0,00	0,47	0,49	0,48
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	2,84	2,89	2,77	4,74	4,70	4,73
Promedio	0,57	0,58	0,55	0,95	0,94	0,95
Desv. Estándar	0,88	0,90	0,85	1,17	1,13	1,18
CV%	154,80	155,08	154,17	123,49	120,32	124,44

Tabla A - 91. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la porosidad total del suelo (%) en finca con riego subfoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	55,91	55,60	52,23	63,71	58,94	64,59
20	53,94	53,73	52,57	60,24	57,92	57,83
30	47,68	47,30	49,17	55,51	53,85	56,42
40	51,00	51,00	50,60	54,05	53,28	54,05
50	50,41	51,18	48,95	52,51	52,49	52,71
Suma	258,94	258,81	253,52	286,02	276,48	285,61
Promedio	51,79	51,76	50,70	57,20	55,30	57,12
Desv. Estándar	3,20	3,14	1,68	4,64	2,92	4,63
CV%	6,18	6,06	3,31	8,12	5,29	8,10

Tabla A - 92. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la porosidad total del suelo (%) en finca con riego suprafoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	55,47	55,16	55,42	58,57	60,24	62,25
20	54,22	55,42	51,81	57,98	57,53	59,92
30	52,51	52,90	52,49	56,11	56,49	55,73
40	52,67	52,67	52,29	56,49	55,73	54,58
50	52,29	51,91	53,44	54,58	52,67	54,58
Suma	267,15	268,06	265,44	283,72	282,65	287,06
Promedio	53,43	53,61	53,09	56,74	56,53	57,41
Desv. Estándar	1,37	1,58	1,43	1,58	2,75	3,49
CV%	2,56	2,94	2,70	2,79	4,87	6,07

Tabla A - 93. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la resistencia a la penetración del suelo (Kpa) en finca con riego subfoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	419,90	430,22	410,53	142,40	131,89	120,55
20	701,58	687,80	690,22	402,55	389,66	389,20
30	610,58	589,56	609,10	985,24	756,87	794,00
40	450,22	589,21	572,05	855,98	658,66	700,61
50	560,22	478,38	505,68	428,75	429,55	402,48
Suma	2742,50	2775,17	2787,58	2814,92	2366,63	2406,84
Promedio	548,50	555,03	557,52	562,98	473,33	481,37
Desv. Estándar	115,78	101,79	105,80	348,14	245,07	269,59
CV%	21,11	18,34	18,98	61,84	51,78	56,00

Tabla A - 94. Efecto del sulfato de calcio y la roturación en la resistencia a la penetración del suelo (Kpa) en finca con riego suprafoliar.

Profundidad(cm)	YESO AGRÍCOLA			ROTURACIÓN		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
10	497,15	450,55	401,56	184,31	150,23	135,75
20	855,69	902,56	830,80	385,45	462,55	365,98
30	1222,56	1056,31	755,26	754,26	698,56	675,35
40	1145,36	1005,30	908,71	1125,38	988,63	1049,98
50	1200,45	1197,51	1009,36	1070,55	1005,26	1100,00
Suma	4921,21	4612,23	3905,69	3519,95	3305,23	3327,06
Promedio	984,24	922,45	781,14	703,99	661,05	665,41
Desv. Estándar	309,55	284,40	232,15	414,12	363,16	420,43
CV%	31,45	30,83	29,72	58,83	54,94	63,18

Tabla A - 95. La superficie específica y los contenidos de arcilla, limo y materia orgánica.

Tratamiento	Profundidad (cm)	SE - BET m ² g ⁻¹	Arcilla%	Limo%	%MO
SBFSC	10	6,9419	16	41	2,42
SBFSC	20	8,1146	11	45	1,52
SBFSC	30	8,9082	5	54	0,20
SBFSC	40	7,1444	6	61	0,00
SBFSC	50	7,7802	6	65	0,00
SBFCC	10	6,8404	11	46	2,67
SBFCC	20	6,4593	11	43	2,18
SBFCC	30	6,1037	6	46	1,37
SBFCC	40	7,4736	5	45	0,85
SBFCC	50	7,9273	5	50	0,00
SPFSC	10	6,0721	5	38	1,99
SPFSC	20	6,9133	5	26	0,63
SPFSC	30	5,6233	2	18	0,00
SPFSC	40	5,7603	2	36	0,00
SPFSC	50	6,3366	2	42	0,00
SPFCC	10	6,6115	11	45	2,61
SPFCC	20	6,794	8	47	2,08
SPFCC	30	6,1977	2	51	0,86
SPFCC	40	7,4098	5	39	0,23
SPFCC	50	9,7993	3	41	0,00

SBFSC; riego subfoliar sin cobertura – SBFCC; riego subfoliar con cobertura – SPFCC; riego suprafoliar con cobertura – SPFSC; riego suprafoliar sin cobertura.

Tabla A - 96. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego suprafoliar con cobertura, Finca El Cisne.

Atm	pF	% ØV
0	0,00	56,87
0,10	2,00	49,20
0,33	2,54	47,75
15	4,20	31,46
100	7,00	0,00

Tabla A - 97. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego suprafoliar sin cobertura, hacienda El Carmen.

Atm	pF	% ØV
0	0,00	55,50
0,10	2,00	50,38
0,33	2,54	48,23
15	4,20	27,35
100	7,00	0,00

Tabla A - 98. Promedio de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego subfoliar con cobertura, Finca El Cisne.

Atm	pF	% ØV
0	0,00	57,67
0,10	2,00	48,05
0,33	2,54	45,30
15	4,20	25,40
100	7,00	0,00

Tabla A - 99. Promedios de contenidos de humedad a diversas tensiones en el sistema de riego subfoliar sin cobertura, finca La Fátima.

Atm	pF	% ØV
0	0,00	55,40
0,10	2,00	45,40
0,33	2,54	44,18
15	4,20	30,19
100	7,00	0,00

FIGURAS DE ANEXO.

Figura A - 1. Diagrama de la densidad aparente en relación con la textura del suelo.

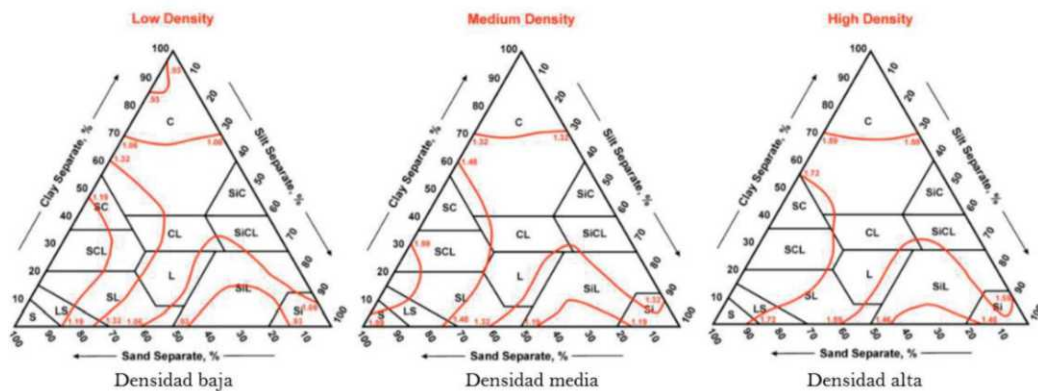


Figura A - 2. Ecuación potencial para la determinación de la ecuación de resistencia a la penetración expresada en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, para la densidad de a) 1.1 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, b) 1.2 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, c) 1.3 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, d) 1.4 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, e) 1.5 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

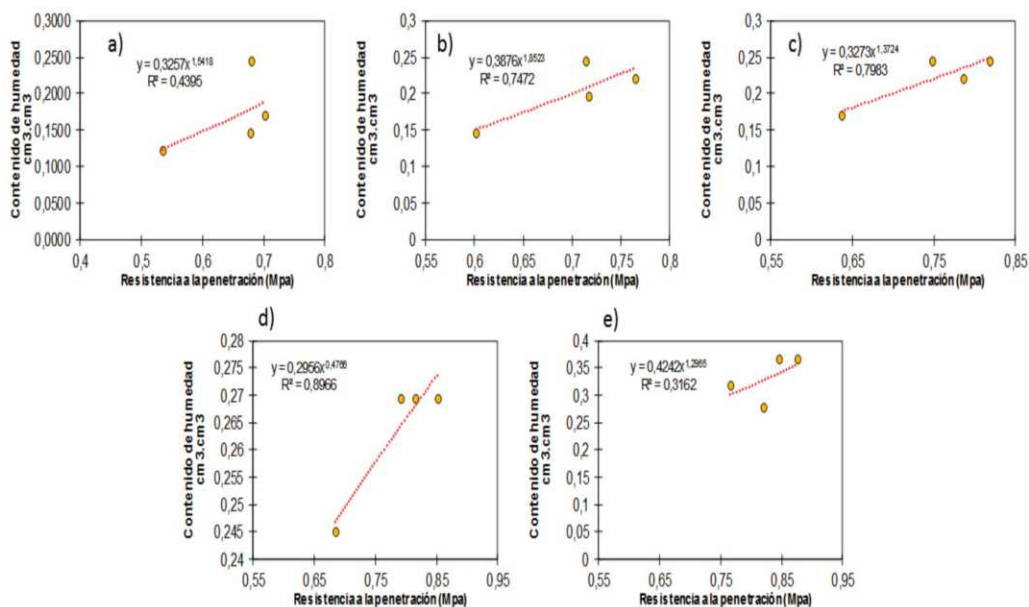


Figura A - 3. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.

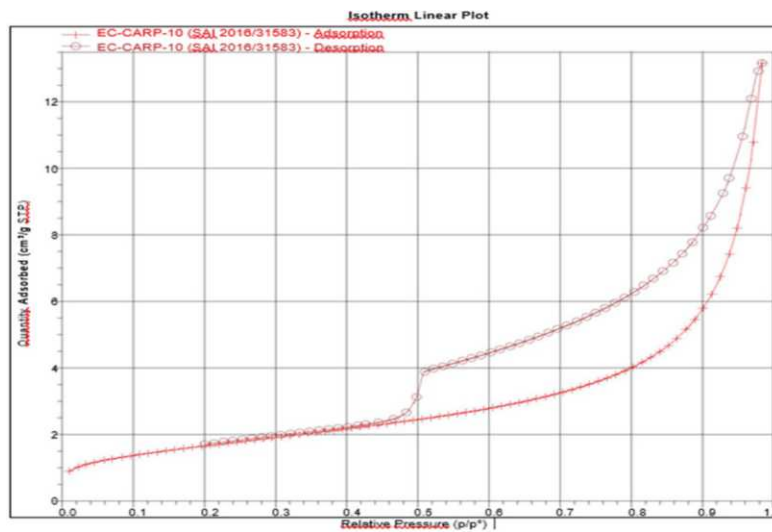


Figura A - 4. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.

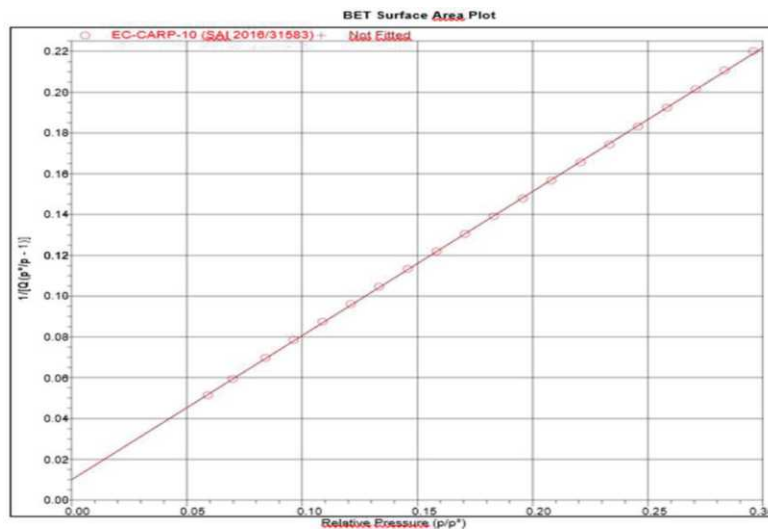


Figura A - 5. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.

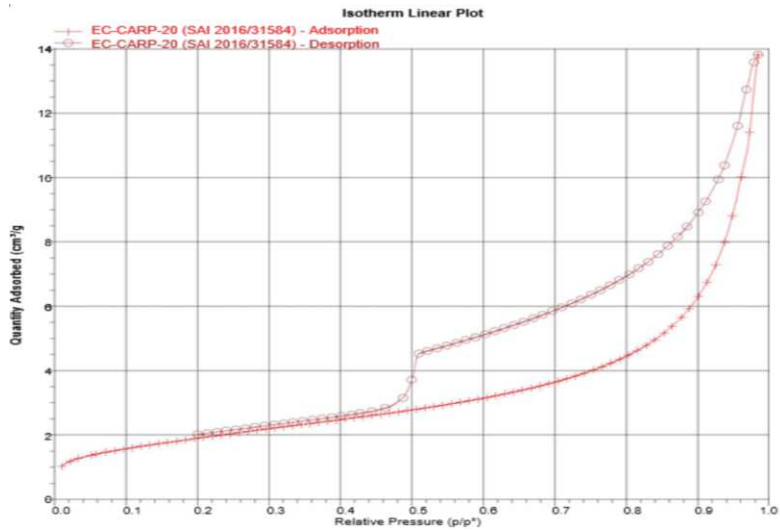


Figura A - 6. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.

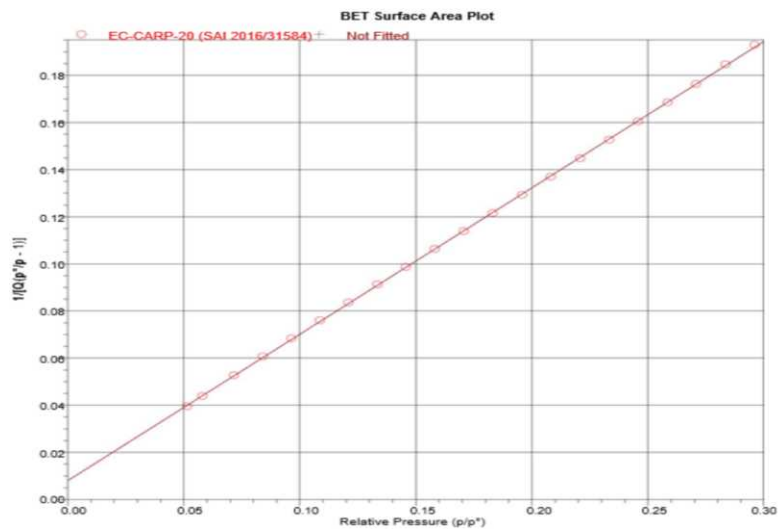


Figura A - 7. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.

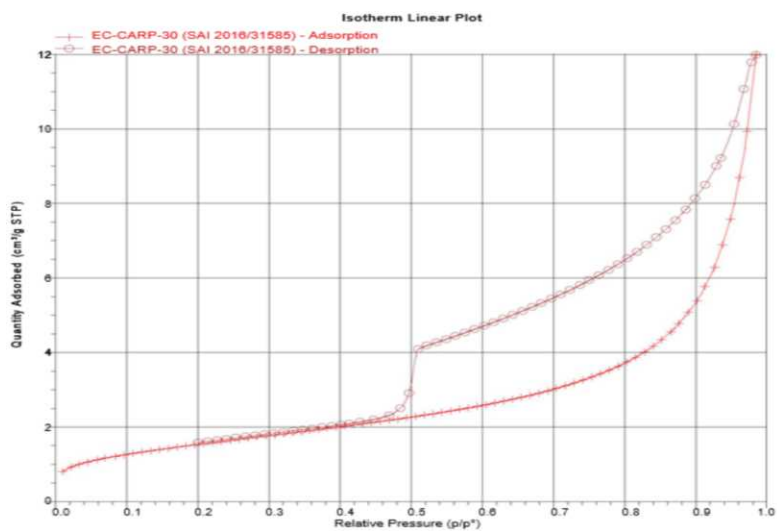


Figura A - 8. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.

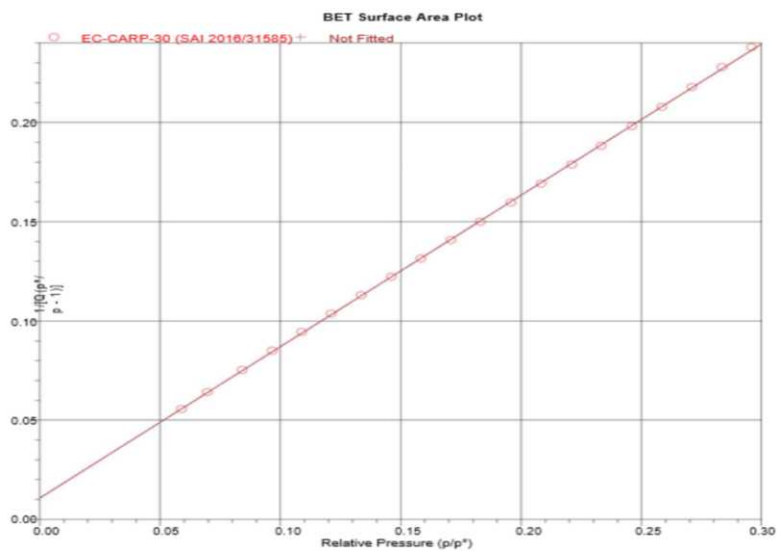


Figura A - 9. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.

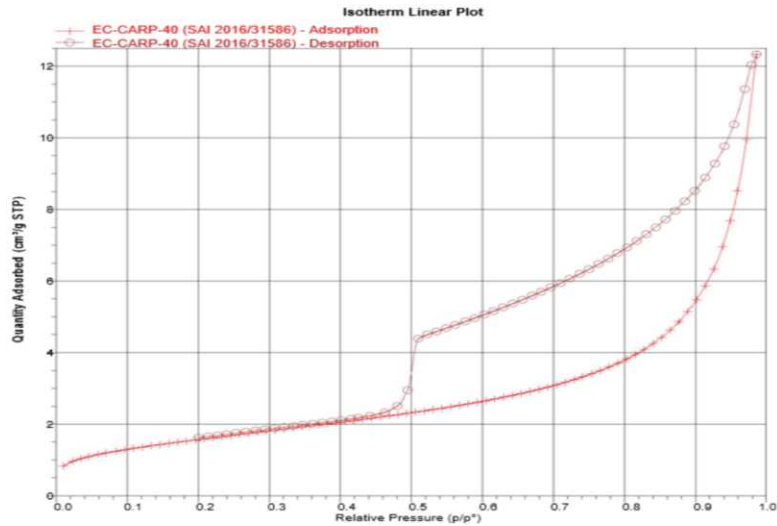


Figura A - 101. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.

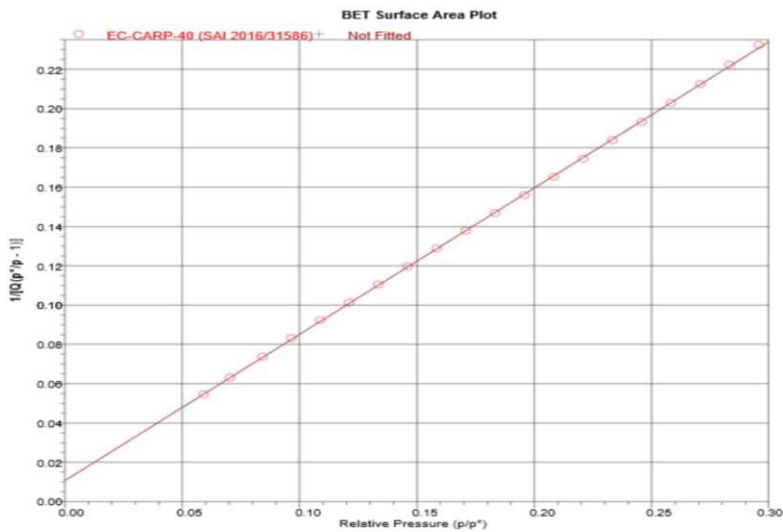


Figura A - 11. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Carmen, con riego suprafoliar sin cobertura.

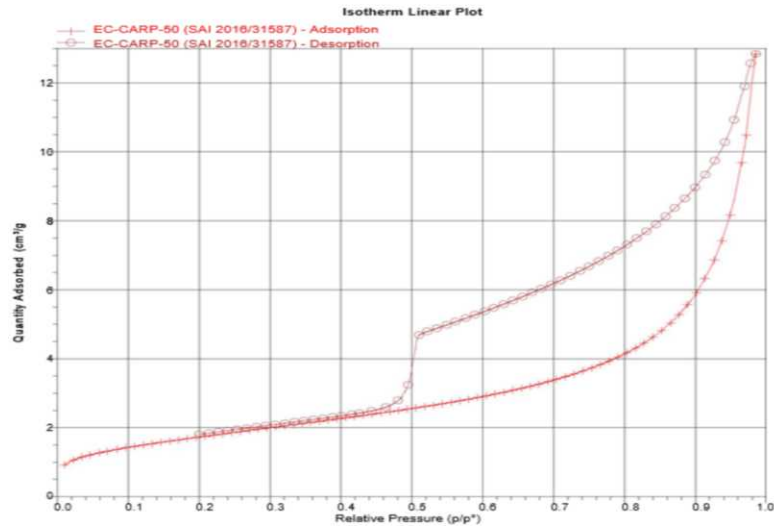


Figura A - 12. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar sin cobertura, Finca El Carmen.

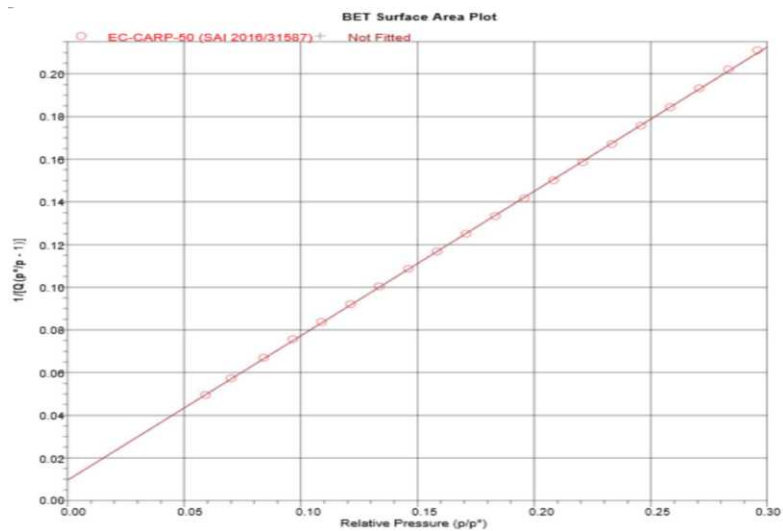


Figura A - 13. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar con cobertura.

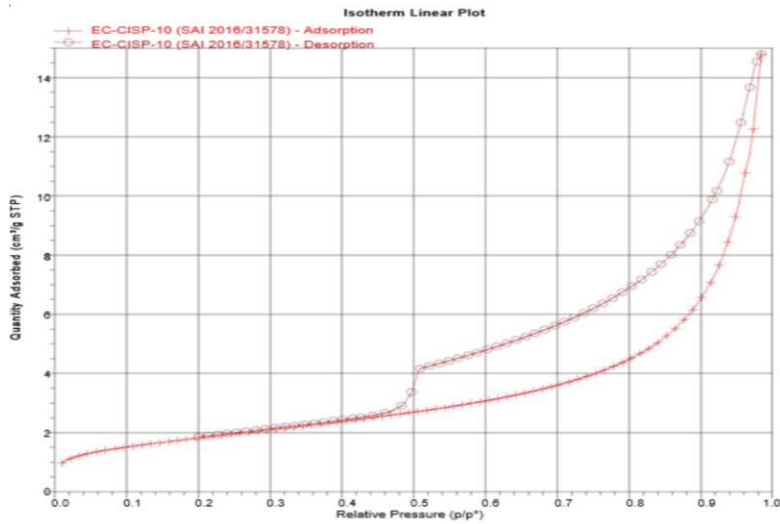


Figura A - 14. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar con cobertura, Finca El Cisne.

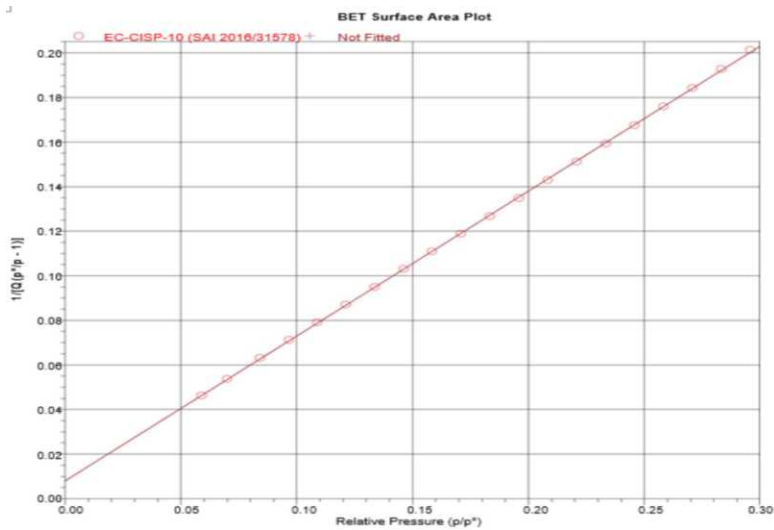


Figura A - 15. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

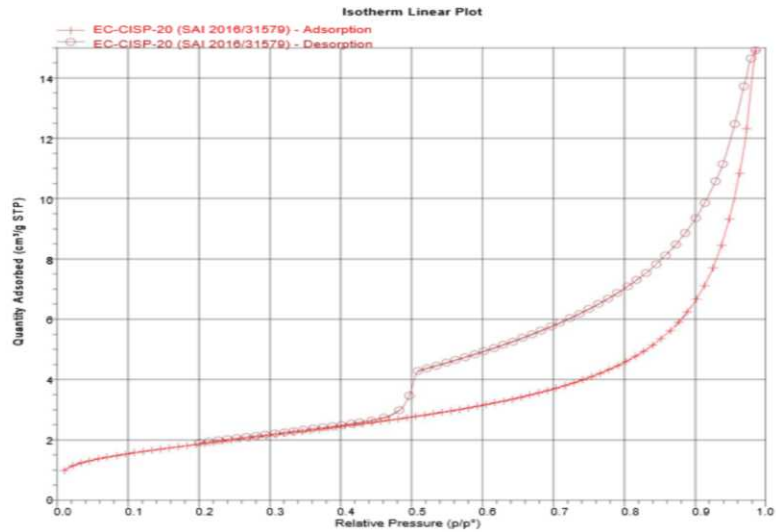


Figura A - 16. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

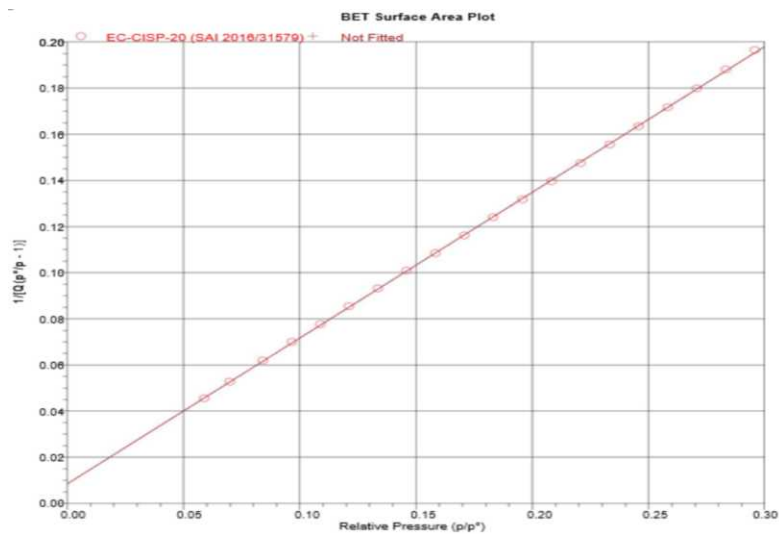


Figura A - 17. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

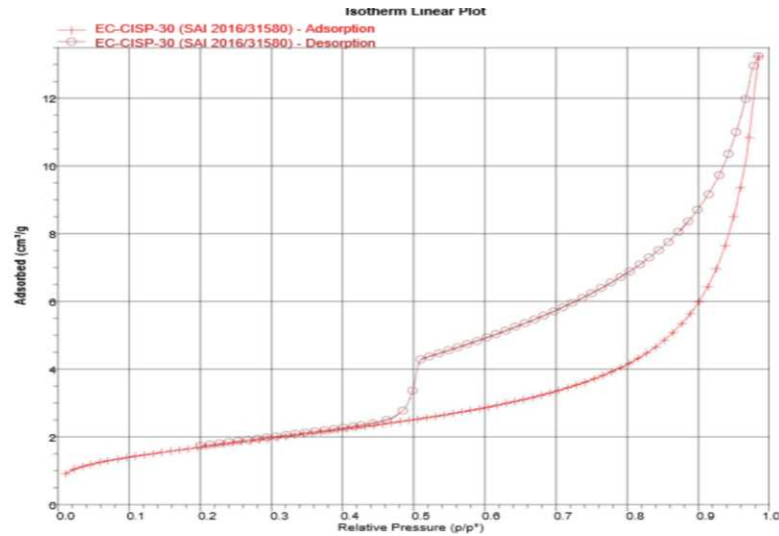


Figura A - 18. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

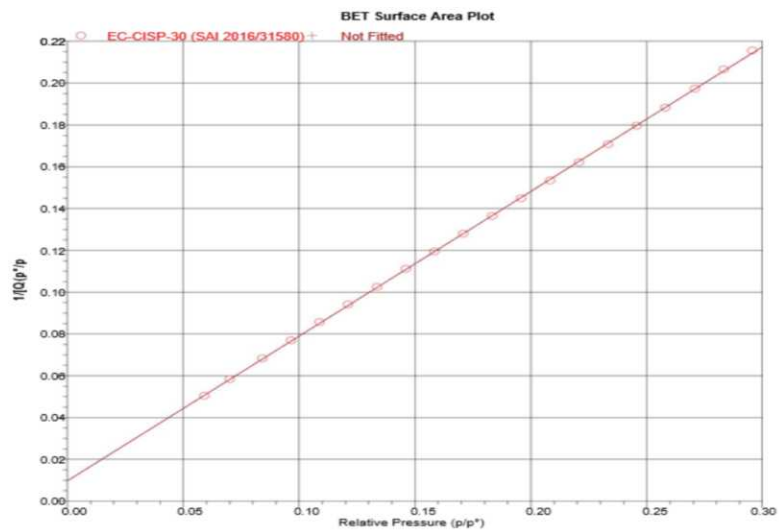


Figura A - 19. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

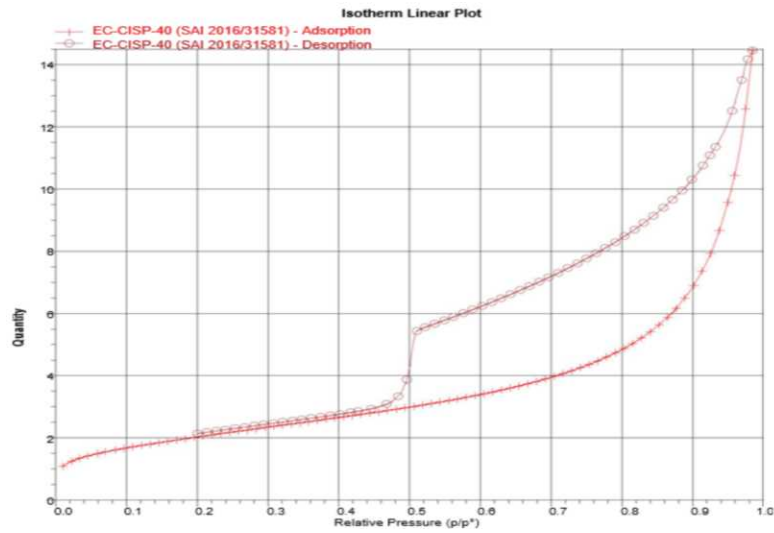


Figura A - 20. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

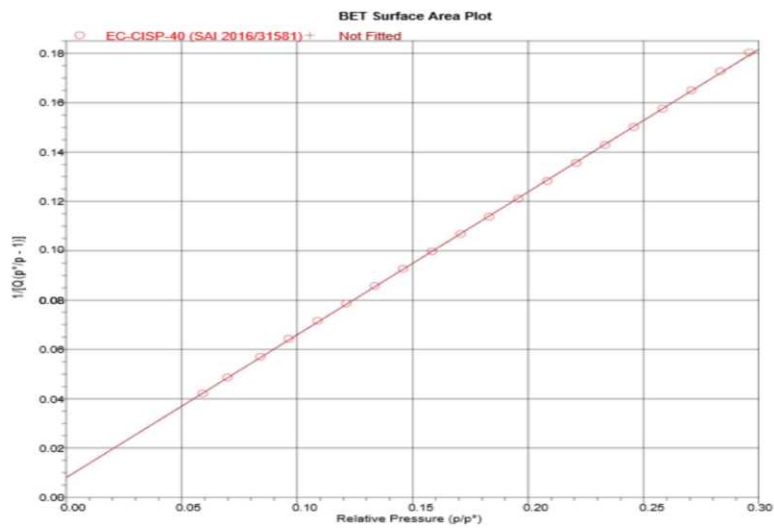


Figura A - 21. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego suprafoliar y cobertura vegetal.

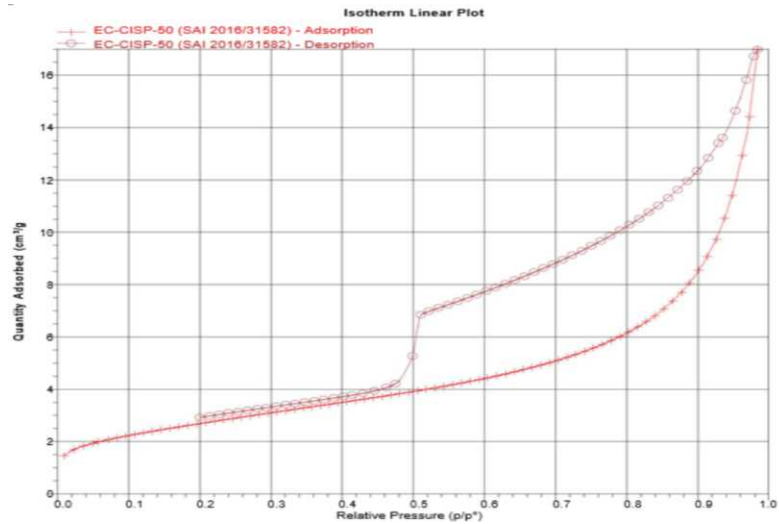


Figura A - 22. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

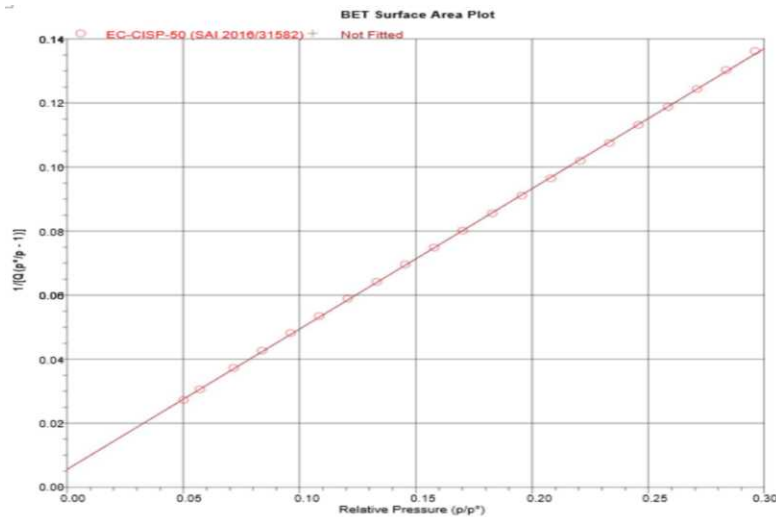


Figura A - 23. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

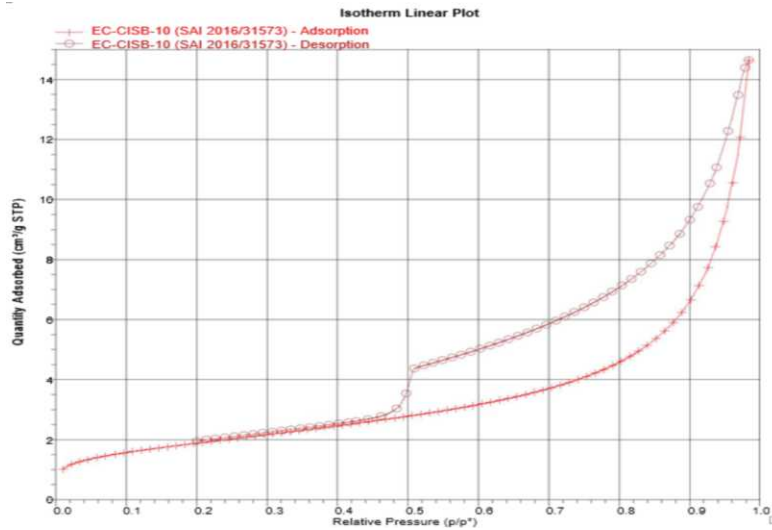


Figura A - 24. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

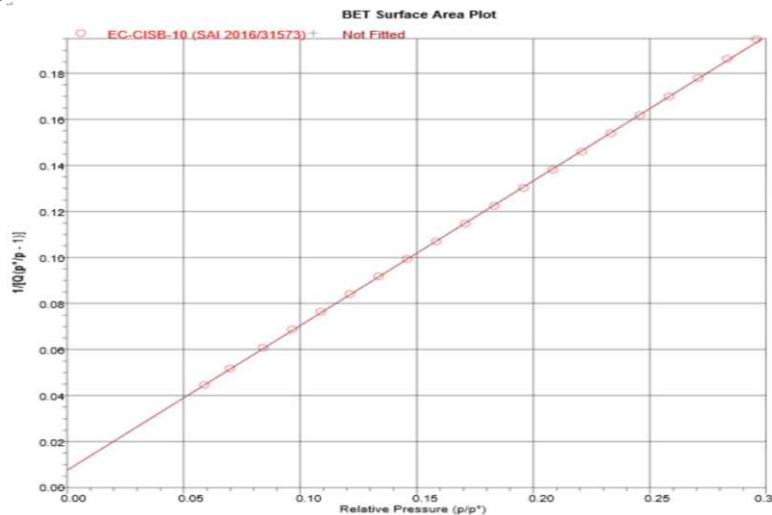


Figura A - 25. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

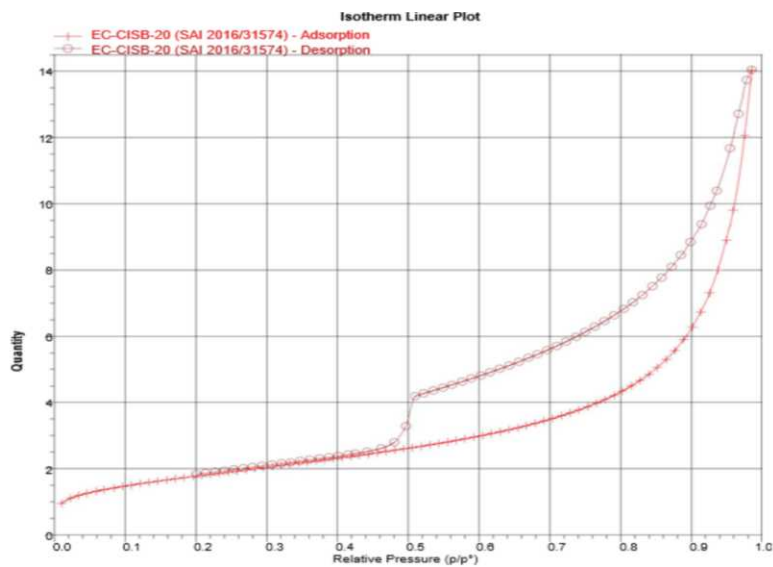


Figura A - 26. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

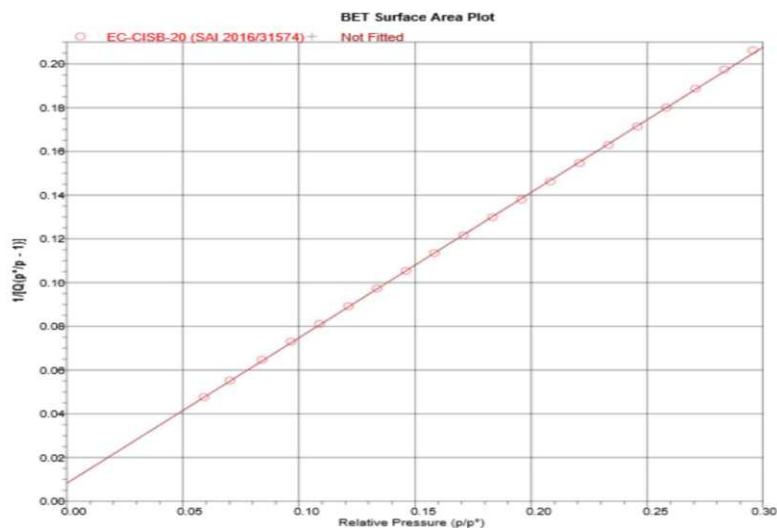


Figura A - 27. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

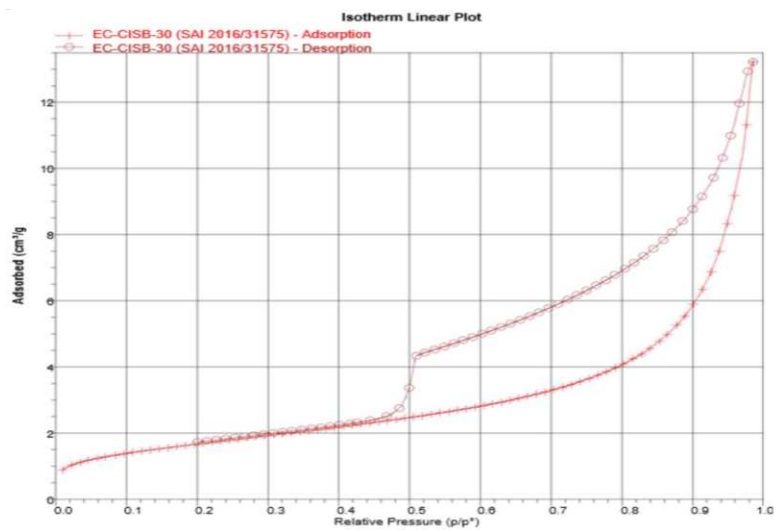


Figura A - 28. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 20 -30 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

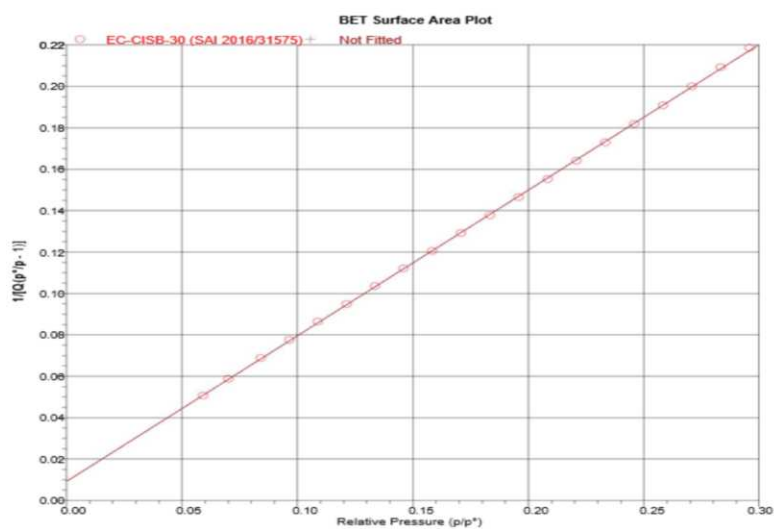


Figura A - 29. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

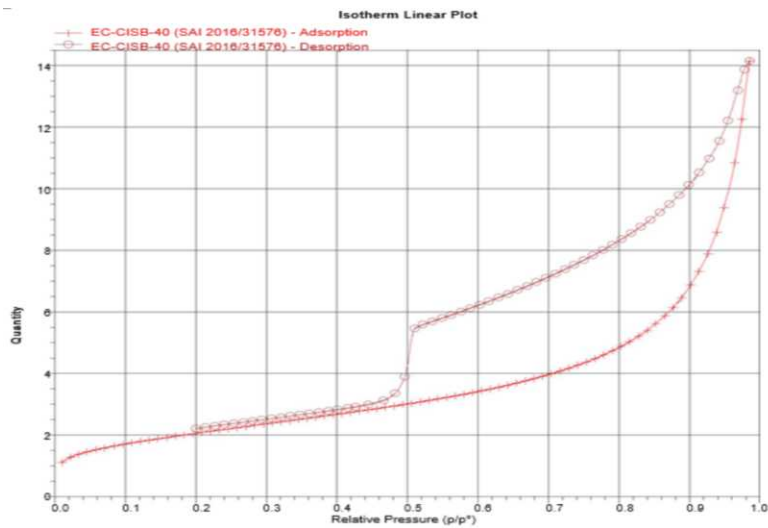


Figura A - 30. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 30-40 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

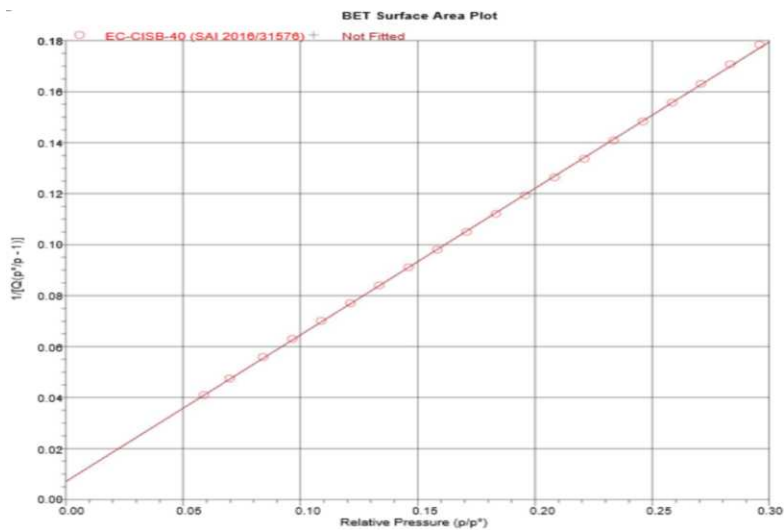


Figura A - 31. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca El Cisne, con riego subfoliar y cobertura vegetal.

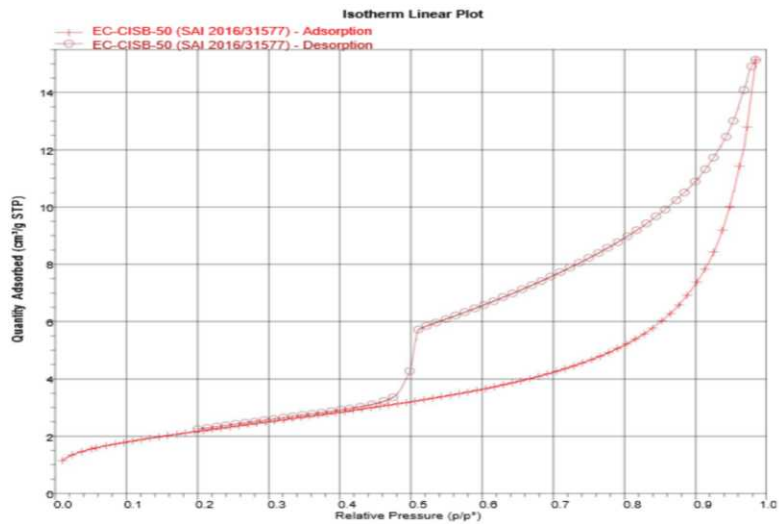


Figura A - 32. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego suprafoliar y cobertura, Finca El Cisne.

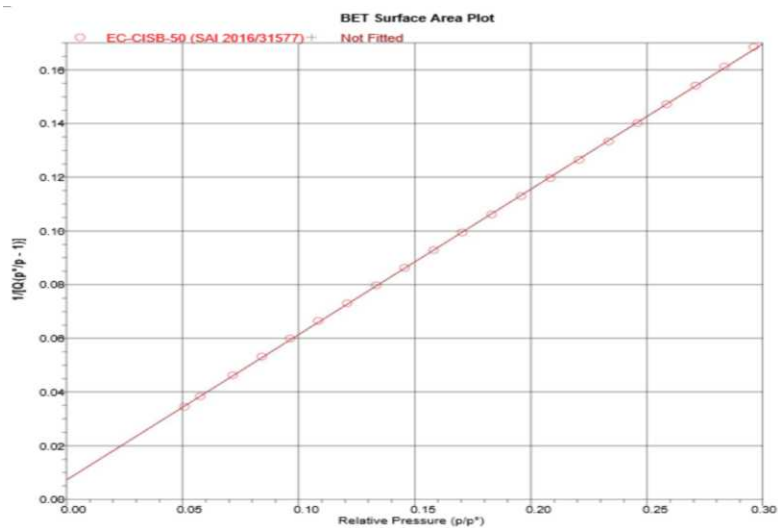


Figura A - 33. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 0 -10 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

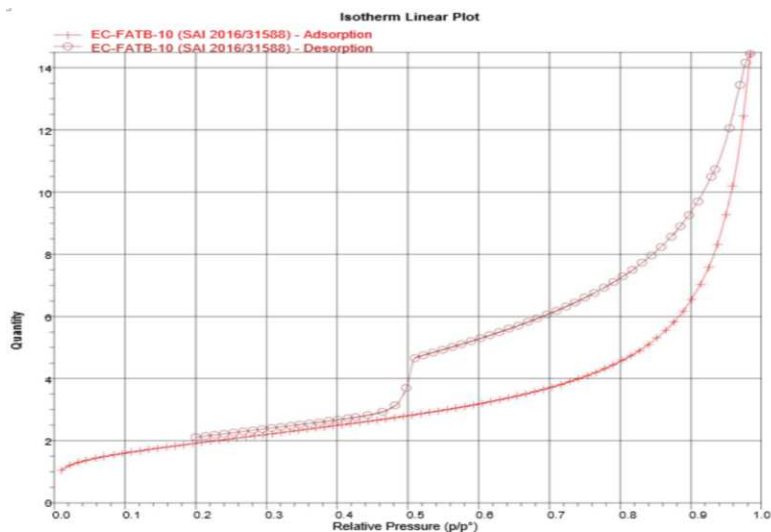


Figura A - 34. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 0 -10 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.

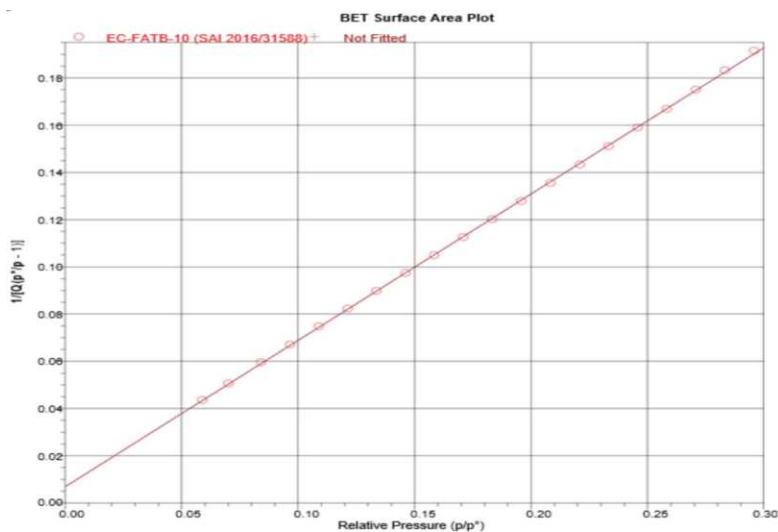


Figura A - 35. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 10 -20 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

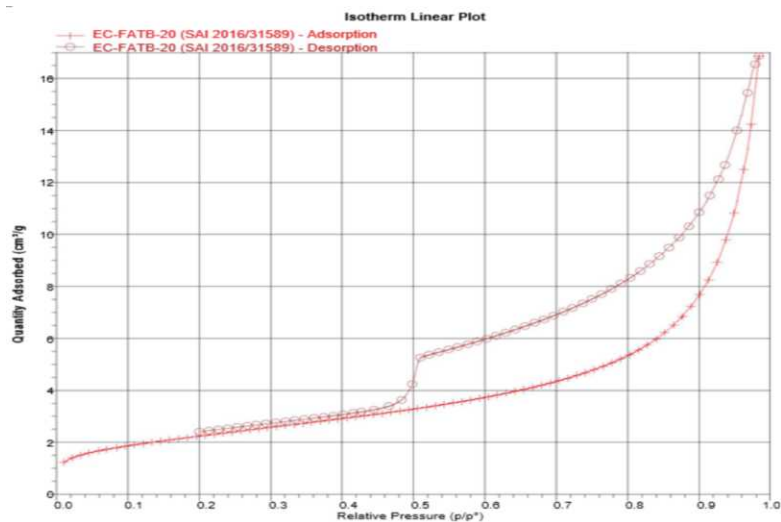


Figura A - 36. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 10 -20 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.

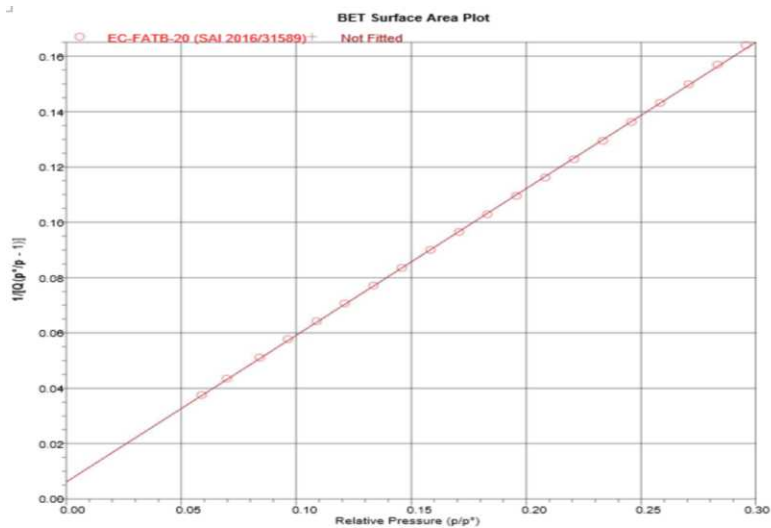


Figura A - 37. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 20 -30 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

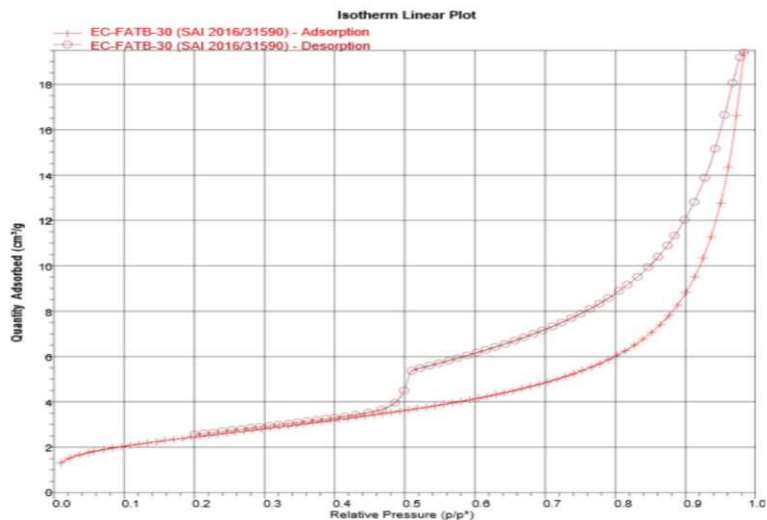


Figura A - 38. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 20-30 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.

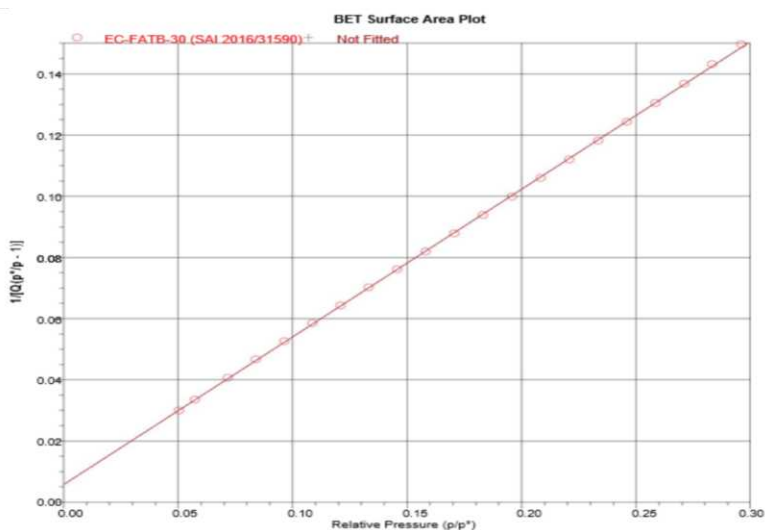


Figura A - 39. Isotherma de adsorción y desorción de N2 a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 30 -40 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

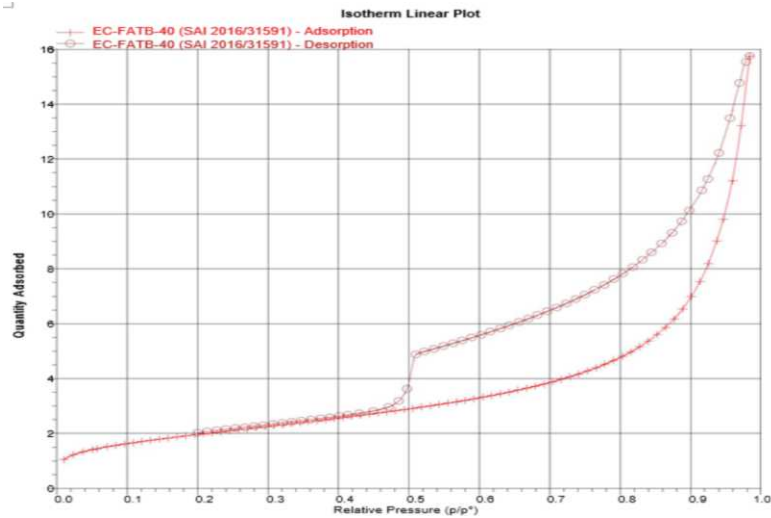


Figura A - 40. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N2, en la determinación de la SE a una profundidad de 30 -40 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.

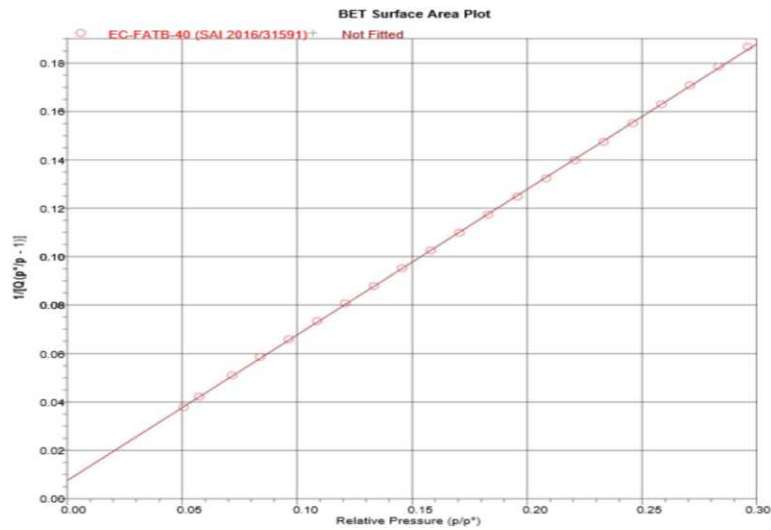


Figura A - 41. Isotherma de adsorción y desorción de N₂ a 77K, en la determinación de la SE en el estrato de 40 -50 cm del perfil de suelo, de la Finca La Fátima, con riego subfoliar sin cobertura vegetal.

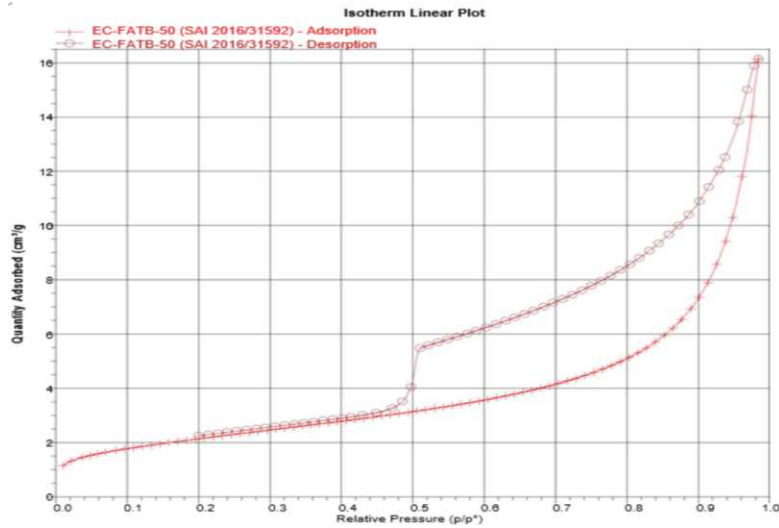


Figura A - 42. Linearización de la isoterma de absorción y desorción del N₂, en la determinación de la SE a una profundidad de 40 -50 cm de suelo, con riego subfoliar sin cobertura, Finca La Fátima.

