

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**MODELACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO AGRÍCOLA
MEDIANTE CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD Y ANÁLISIS ESPACIAL**

POR:

ERICKSON FERNANDO MENDOZA RODRIGUEZ

TESIS



CATACAMAS

OLANCHO

SEPTIEMBRE 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

MODELACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO AGRÍCOLA
MEDIANTE CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD Y ANÁLISIS ESPACIAL

POR:

ERICKSON FERNANDO MENDOZA RODRIGUEZ

M.Sc. EDUARDO ARIEL CASTRO BLANDIN

Asesor principal

TESIS PRESENTADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO

CATACAMAS

OLANCHO

SEPTIEMBRE 2026

ACTA DE SUSTENTACIÓN

DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme en cada paso de este camino, por darme la fortaleza para no rendirme en los momentos difíciles y por permitirme llegar hasta este día. A Él le agradezco la vida, las oportunidades y la sabiduría para enfrentar cada desafío y convertir cada dificultad en una razón para seguir adelante.

A mi madre, Sintia Iveth Rodríguez Raudales y a Giovvy Leonel Martínez, por ser pilares fundamentales en mi vida. Gracias por su amor, sus consejos, sus sacrificios y por siempre creer en mí. Cada palabra de ánimo, cada esfuerzo y cada muestra de apoyo fueron parte de este logro. Este triunfo también les pertenece, porque detrás de cada paso que he dado siempre ha estado su apoyo.

A mi tía, Nohelia Lilibeth Raudales Martínez, por su cariño, sus consejos y por estar presente en diferentes momentos de mi vida. Gracias por apoyarme y por brindarme siempre palabras que me motivaron a continuar y a no abandonar mis sueños.

A mi hermano, Giovvy Santiago Martínez Rodríguez, por ser parte importante de mi vida y por compartir conmigo este camino. Espero que este logro sea también un ejemplo para, para que siempre tenga presente que con esfuerzo, dedicación y perseverancia es posible alcanzar las metas propuestas.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme en cada paso de este camino, por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar las dificultades y permitirme alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mi madre, Sintia Iveth Rodríguez Raudales, y a Giovvy Leonel Martínez, por su amor, apoyo y confianza incondicional. Gracias por sus sacrificios, consejos y palabras de motivación que me impulsaron a seguir adelante y nunca rendirme.

A mi familia, por su cariño, apoyo y estar presente durante este proceso. Gracias por cada palabra de ánimo y por acompañarme en los momentos buenos y difíciles que hicieron parte de este camino.

A la Universidad Nacional de Agricultura (UNAG), por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, adquirir conocimientos y vivir experiencias que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal.

A mis asesores, M.Sc. Eduardo Castro, M.Sc. Carlos Irías y M.Sc. Alexis Vallecillo, por su paciencia, amabilidad y tiempo. Gracias por ser parte de mi formación profesional. Me llevo grandes aprendizajes y una profunda admiración por los excelentes profesionales y seres humanos que son.

A mis amigos y compañeros, por su amistad, apoyo y por cada experiencia compartida. Gracias por las risas, consejos y hacer de esta etapa universitaria una experiencia llena de buenos recuerdos.

CONTENIDO

	Pàg.
ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
CONTENIDO.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo General.....	4
2.2. Objetivos específicos	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. Cultivo de caña de azúcar	5
3.2. Requerimientos hídricos del cultivo	5
3.3. Generalidades y función del riego	5
3.4. Evapotranspiración de cultivo (ETc)	6
3.5. Relación básica suelo-agua- planta.....	6
3.6. Humedad en el suelo.....	6
3.6.1. Humedad gravimétrica	6
3.6.2. Humedad Volumétrica.....	7
3.7. Infiltración del agua en el suelo	7
3.8. Estado energético de agua en el suelo.....	7
3.9. Potencial hídrico	8
3.9.1. Potencial gravitacional	8
3.9.2. Potencial osmótico.....	9

3.9.3.	Potencial matricial	9
3.9.4.	Potencial de presión.....	9
3.10.	Contenido de agua en el suelo.....	9
3.10.1.	Saturación	10
3.10.2.	Capacidad de campo (CC)	10
3.10.3.	Punto de marchitez permanente (PMP)	11
3.10.4.	Agua aprovechable.....	11
3.11.	Curva de retención de humedad del suelo.....	12
3.11.1	Antecedentes históricos de la CRHS	13
3.11.2.	Métodos para determinar la humedad del suelo	14
3.12.	Relación entre la CRHS y otras propiedades del suelo.....	19
3.12.1.	Textura del suelo.....	19
3.12.2.	Contenido de materia orgánica	21
3.12.3.	Densidad aparente.....	21
3.12.3.	Estructura del suelo.....	22
3.12.4.	Porosidad del suelo	24
3.13.	Importancia de las curvas de retención de humedad en la agricultura.....	24
IV.	MATERIALES Y METODOS	26
4.1.	Ubicación	26
4.2.	Materiales y equipo.....	28
4.3.	Diseño y enfoque de investigación	29
4.4	Procedimiento	29
4.5.	Fase preliminar.....	32
4.6.	Fase de campo.....	32
4.6.1.	Muestreo en campo.....	33
4.6.2.	Toma de Muestras Indisturbadas.....	33
4.6.3.	Tratamiento y transporte de las muestras de suelo	34
4.7.	Fase de laboratorio.....	35
4.7.1.	Textura del suelo	35
4.7.2.	Materia orgánica	37
4.7.3.	Conductividad eléctrica	38
4.7.4.	Densidad real	40
4.7.5.	Determinación de la Densidad aparente	41
4.7.7	Porosidad total	41

4.7.7.	Curva de retención de humedad del suelo	42
4.8.	Fase de análisis estadístico.....	46
4.8.1.	Ajuste de las curvas mediante el modelo de van Genuchten.....	47
4.8.2.	Construcción de las curvas de retención de humedad	48
4.8.3.	Análisis estadístico descriptivo	48
4.8.4.	Prueba de normalidad	49
4.8.5.	Análisis de linealidad de las propiedades físicas del suelo	49
4.8.6.	Análisis de correlación	50
4.8.7.	Análisis de regresión lineal múltiple	50
4.8.8.	Selección de modelos para las funciones de pedotransferencia	51
4.8.9.	Variables complementarias para determinar FPT	52
4.8.10.	Funciones de pedotransferencia (FPT)	52
4.8.11.	Validación de funciones de pedotransferencia	53
4.8.12.	Comparación entre valores observados y estimados	54
4.8.13.	Análisis espacial y geoestadístico	55
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
5.1.	Fase preliminar.....	56
5.1.1.	Distribución espacial de los puntos de muestreo.....	56
5.2.	Fase de campo.....	57
5.2.1	Muestreo y distribución de muestras	57
5.3.	Fase de laboratorio.....	58
5.3.1.	Caracterización de las propiedades físicas del suelo	58
5.3.2.	Diferencias de las propiedades físicas entre fincas	59
5.3.3.	Diferencias de las propiedades físicas entre lotes	61
5.3.4.	Caracterización textural.....	63
5.3.5.	Determinación del contenido de humedad mediante la olla de presión Richards	64
5.3.6.	Constantes hídricas.....	66
5.4.	Fase de análisis estadístico.....	69
5.4.1.	Modelo de ajuste van Genuchten.....	70
5.4.2.	Construcción y ajuste de las curvas de retención de humedad.....	73
5.4.3.	Comparación de las curvas de retención de humedad entre fincas	84
5.4.4	Prueba de normalidad de los datos	85
5.4.5.	Análisis de linealidad de las tendencias	87
5.4.6.	Selección del coeficiente de correlación	88

5.4.7.	Análisis de correlación entre las propiedades físicas del suelo	90
5.4.8.	Análisis de correlación entre el contenido de humedad y las propiedades físicas del suelo	92
5.4.9.	Desarrollo de las funciones de pedotransferencia (FPT).....	94
5.4.10.	Modelación propia de Funciones de Pedotransferencia.....	102
5.4.11.	Validación de las Funciones de Pedotransferencia	105
5.4.12.	Relación estadística entre contenido de humedad estimados por FPT propias y datos experimentales de laboratorio.....	110
VI.	CONCLUSIONES	114
VII.	RECOMENDACIONES	115
VIII.	BIBLIOGRAFIA	116
IX.	ANEXOS.....	123

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de métodos indirectos para determinar la humedad del suelo.....	18
Cuadro 2. Clasificación de la textura del suelo	23
Cuadro 3. Resumen de cada fase ejecutada.....	30
Cuadro 4. Resumen del Proceso Metodológico de Olla de Presión Richards.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de retención de humedad aprovechable en suelos con diferentes texturas.	7
Tabla 2. Parámetros hídricos de los suelos en función de su clase textural	20
Tabla 3. Propiedades físicas de suelos con diferentes texturas no compactados.....	21
Tabla 4. Valores orientativos de la porosidad total de un suelo y su interpretación	24
Tabla 5. Variables medidas, simbología, método de determinación y unidades.	31
Tabla 6. Presiones recomendadas para la determinación de curvas de retención según textura del suelo.....	44
Tabla 7. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 33 kPa (CC).	52
Tabla 8. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 1 500 kPa (PMP).	53
Tabla 9. Distribución de las muestras por finca y profundidad.....	57
Tabla 10. Estadísticos descriptivos generales de las propiedades físicas del suelo (n=60).....	59
Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas por finca (medias $\pm$ DE).	60
Tabla 12. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas por finca y lote (medias $\pm$ DE).	61
Tabla 13. Distribución de arena, limo y arcilla por finca, lote y profundidad.....	63
Tabla 14. Contenido de humedad promedio del suelo en función de la tensión matricial para ambas profundidades	65
Tabla 15. Capacidad de campo según el potencial matricial por finca, lote y profundidad	68
Tabla 16. Coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) del ajuste del modelo de van Genuchten para las curvas de retención de humedad del suelo en cada finca y profundidad.....	70
Tabla 17. Parámetros hidráulicos del modelo van Genuchten.	72
Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables analizadas	86
Tabla 19. Prueba de linealidad y presencia de curvatura entre las propiedades físicas del suelo.	87
Tabla 20. Comparación de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman entre las propiedades físicas del suelo	89
Tabla 21. Resumen del desempeño de los seis modelos bibliográficos de pedotransferencia evaluados a diferentes tensiones.....	95
Tabla 22. Ecuaciones de regresión correspondientes a los modelos con mejor desempeño para estimar el contenido de humedad del suelo a diferentes tensiones.....	96
Tabla 23. Comparación de los modelos Stepwise y Backward seleccionados mediante GLMSELECT para las diferentes tensiones.....	103
Tabla 24. Funciones de pedotransferencia propias seleccionadas mediante el procedimiento Backward para las diferentes tensiones.	104
Tabla 25. Comparación entre valores de humedad estimados por FPT (mejor modelo bibliografico por tensión) y observados con ollas de presión Richards para diferentes tensiones (hPa).....	107

Tabla 26. Indicadores de desempeño de las funciones de pedotransferencia propias para las diferentes tensiones evaluadas.....	109
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de humedad del suelo con el punto de inflexión que determina la Capacidad de Campo (CC) del suelo después del riego.....	10
Figura 2. Esquema de las constantes hídricas del suelo.	11
Figura 3. Curva de retención de humedad del suelo.	13
Figura 4. Extractor (olla presión) y plato cerámica.....	16
Figura 5. Triangulo de las clases texturales básicas del suelo.....	20
Figura 6. Ubicación laboratorio Riegos y Suelos, Universidad Nacional De Agricultura.....	26
Figura 7. Procedimiento para el análisis de la textura del suelo mediante el método de Bouyoucos.	36
Figura 8. Esquema metodológico para la determinación del carbono orgánico del suelo mediante el método de Walkley y Black (1934).	37
Figura 9. Esquema metodológico empleado para la determinación de la conductividad eléctrica del suelo mediante el procedimiento descrito por la FAO (2021b).....	39
Figura 10. Esquema metodológico empleado para la determinación de la densidad real del suelo mediante el método del picnómetro.....	40
Figura 11. Relación de las fases del suelo con la porosidad	42
Figura 12. Constantes hídricas medias (cm ³ cm ⁻³) para las fincas evaluadas (medias ± DE).	66
Figura 13. Constantes hídricas medias (cm ³ cm ⁻³) para cada finca y profundidad evaluada. .	67
Figura 14. Curvas de retención de humedad para la finca Los Llanos. A) Lote 20; B) Lote 40.	73
Figura 15. Curvas de retención de humedad para la finca Palo Verde. A) Lote 09; B) Lote 21.	75
Figura 16. Curvas de retención de humedad para la finca Santa Paula. A) Lote 09; B) Lote 23.	77
Figura 17. Curvas de retención de humedad para la finca Santa Paula. A) Lote 37; Tronadora 1, B) Lote 08.....	79
Figura 18. Curvas de retención de humedad para la finca Tronadora 1. A) Lote 10; B) Lote 13.	81
Figura 19. Curvas de retención de humedad para la finca Tronadora 2 S1. A) Lote 09; B) Lote 17.	83
Figura 20. Matriz general de correlación de Spearman entre las propiedades físicas del suelo.	91
Figura 21. Matriz general de correlación de Spearman entre las propiedades físicas y el contenido de humedad a diferentes tensiones matriciales.	93
Figura 22. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Los Llanos.	97

Figura 23. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Palo Verde.	98
Figura 24. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Santa Paula.	99
Figura 25. . Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Tronadora 1.	100
Figura 26. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Tronadora 2 S1	101
Figura 27. Comparación del RMSE de los diferentes modelos de pedotransferencia evaluados para cada tensión (hPa).....	106
Figura 28. Comparación entre valores observados y predichos mediante el modelo Backward para las fincas Los Llanos, Palo Verde, Santa Paula y Tronadora 1.	110
Figura 29. Comparación entre valores observados y predichos mediante el modelo Backward para la finca Tronadora 2 S1.....	111
Figura 30. Relación general entre el contenido de humedad observado y el predicho mediante las funciones de pedotransferencia propias seleccionadas con el modelo Backward.	112

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Kit Muestreador de Suelo “Soil Core Sampler” (Model 0200).....	123
Anexo 2. Cilindros muestreadores modelo 0200	123
Anexo 3. Ollas de Presión Richards (Laboratorio riegos UNAG)	123
Anexo 4. Placa de cerámica porosa.....	123
Anexo 5. Muestras de suelo indisturbadas	124
Anexo 6. Toma de muestras a las profundidades seleccionadas	124
Anexo 7. Esquema de ollas de presión Richards.....	124
Anexo 8. Muestras de suelo indisturbadas con papel filtro.....	124
Anexo 9. Muestras de suelo indisturbadas en saturación por capilaridad.....	124
Anexo 10. Muestras indisturbadas dentro de la Olla Richards	124
Anexo 11. Aplicación de presión (0.01 Bar).....	124
Anexo 12. Vista drenaje de muestras sometidas a presión.....	124
Anexo 13. Esquema funcionamiento de las Ollas Richards.....	124
Anexo 14. Pesaje muestras húmedas (0.01 bar).....	124
Anexo 15. Muestras indisturbadas puestas en el horno.....	124
Anexo 16. Software SAS (Statistical Analysis System)	124
Anexo 17. Software RETC.....	124

RESUMEN

La caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo permite comprender el comportamiento del agua en el suelo en función de la energía con que es retenida, contribuyendo a mejorar el manejo y la eficiencia del riego. No disponer de información precisa puede provocar una mala gestión de los recursos hídricos. El presente trabajo tuvo como objetivo determinar el comportamiento espacial de las propiedades hidráulicas del suelo mediante la caracterización de las propiedades físicas y la modelación de curvas de retención de humedad. Se desarrolló en dos fases; la primera de campo, se desarrolló en fincas de la Compañía Azucarera Tres Valles, mediante un muestreo a profundidades de 0–20 y 20–40 cm, la segunda de laboratorio, se desarrolló en los laboratorios de Riego y Suelos de la Universidad Nacional de Agricultura. Se analizaron textura, materia orgánica, densidad aparente y porosidad del suelo. Se obtuvieron curvas de retención de humedad mediante la olla de presión Richards y se ajustaron al modelo de van Genuchten; además, se desarrollaron funciones de pedotransferencia. Los resultados evidenciaron variabilidad en las propiedades físicas e hidráulicas entre fincas y profundidades. La textura Franco Arenosa fue predominante (78.6 %), seguida de la textura Franco Arcillo Arenosa (14.3 %). La capacidad de campo varió entre pF 0.69 y 2.56, y el agua disponible máxima fue de $0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. El modelo de van Genuchten presentó un ajuste ($R^2 > 0.99$). El modelo de Malavé mostró mejor desempeño entre las funciones de pedotransferencia bibliográficas, mientras las funciones propias seleccionadas mediante Backward alcanzaron un RMSE de 5.43 % y MAE de 4.58 %. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la variabilidad hidráulica para mejorar el manejo del riego.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una actividad agrícola de gran importancia socioeconómica en el mundo, catalogado como el cultivo sacarífero de mayor importancia a nivel mundial, se considera el responsable del 70 % de la producción mundial de azúcar, teniendo un área total de producción mundial de 19.20 millones de hectáreas que están distribuidas en América 47.7 %, Asia 42.5 %, África 7.4% y Oceanía 2.4% (FAO 2009). En Honduras la elaboración de azúcar representa el 12.6 % del valor total de las exportaciones en la industria alimentaria nacional, ocupando un área total de producción de 47,924 hectáreas, produciendo 4 millones 117 mil TM de azúcar (Díaz Montejó y Portocarrero Rivera 2002).

Este cultivo emplea directamente a nivel nacional alrededor de 25 mil personas e indirectamente a más de 100 mil personas. De acuerdo con estudios sobre el aporte nutricional de muchos cultivos, la caña de azúcar se considera un cultivo fortificado debido a su alto aporte calórico y a su contenido de ciertas vitaminas. El azúcar como producto final de consumo, es necesaria para ser un suplemento calorífico en la dieta humana, ser fuente principal del edulcorante natural más consumido a nivel mundial. También en el proceso de la caña de azúcar se obtienen subproductos como ser melaza y bagazo, además sirve de base para la obtención de alcohol y producción de biocombustibles (Osorio Cadavid 2007).

Según proyecciones de FAO (2009), para el año 2050 será necesario que la producción de alimentos a nivel mundial se incremente en un 70% debido a un incremento en la población mundial de aproximadamente 9,100 millones de personas por lo que es un reto actuar de forma técnica y eficiente para satisfacer la creciente demanda de alimentos. El cambio climático, las diferentes prácticas agrícolas y cambio de uso de suelo están afectando la capacidad de los suelos para poder producir, en especial las características relacionadas con su fertilidad física afectando la cantidad de materia orgánica y sobre todo la capacidad para retener humedad,

factores claves que influyen para que el cultivo exprese su potencial genético (Zegarra et al. 2011).

La humedad en el suelo es crucial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, con la cantidad de humedad adecuada las plantas pueden absorber los nutrientes y llevar a cabo la fotosíntesis. La humedad juega un papel clave en la regulación de la temperatura del suelo y en la disponibilidad de oxígeno para las raíces de las plantas. La capacidad que tiene un suelo para retener humedad depende de factores como ser las interacciones entre las propiedades físicas del suelo y como está condicionan el mismo para poder disponer de la humedad en el suelo, así también como las labores culturales, que pueden tener un impacto considerable sobre ella (Bejar *et al.*, 2020).

El cultivo de caña de azúcar necesita tener una humedad dentro de su rango, sin embargo, su consumo es bajo influenciado por su poca capacidad de expansión radicular y foliar. Los requerimientos hídricos, oscilan entre 1200 y 1500 mm/año (Durman 2023). La etapa de rápido crecimiento (4 a 10 meses) es un periodo vegetativo donde se requiere cerca del 60% de agua, es importante contar con el riego adecuado en esta fase, de no ser así la planta podría entrar en un déficit hídrico y perder hasta un 40% del rendimiento total del cultivo (Figueroa *et al.*, 2018). Por medio de riegos adicionales para la caña de azúcar posibilitan llegar a promedios más altos de producción de caña (120 t/ha) y a un rendimiento promedio de azúcar (13,8t/ha). (Figueroa *et al.*, 2018).

Actualmente en la Compañía Azucarera Tres Valles disponer de información acertada de contenido de humedad del suelo en función de la energía a la que esta retenida (pF), se ha vuelto un reto y es por eso que contar con una caracterización hidráulica realista y local es vital para hacer uso eficiente de los recursos hídricos, de forma que ayude a mantener un equilibrio adecuado de humedad en el suelo que se va a traducir en una buena asimilación de los nutrientes aplicados al suelo para que las plantas los puedan tomar y realizar sus todas sus funciones y poder expresar todo su potencial genético. La extrapolación de datos de suelos con diferentes características con respecto a los suelos de Honduras genera incertidumbre, lo que puede

traducirse en un riego ineficiente, ya sea por déficit o exceso, disminuyendo la productividad y generando un uso inadecuado del recurso hídrico.

Este trabajo de investigación se realizó con el propósito de contribuir al mejoramiento del manejo del riego en las fincas de caña de azúcar de la Compañía Azucarera Tres Valles, mediante la caracterización local de las propiedades hidráulicas y físicas del suelo. Se realizaron muestreos en campo y análisis de laboratorio orientados a la determinación de las curvas de retención de humedad del suelo, así como a la generación de información sobre la variabilidad espacial de las propiedades evaluadas. Asimismo, se elaboraron mapas de distribución espacial a partir de los puntos de muestreo, con el propósito de representar el comportamiento de dichas propiedades en el área de estudio. La información generada permite disponer de una base más precisa para apoyar la toma de decisiones relacionadas con el manejo del riego, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar el comportamiento espacial de las propiedades hidráulicas del suelo, a partir de la caracterización de sus propiedades físicas y la modelación de las curvas de retención de humedad, considerando su variabilidad a través de análisis espacial para la optimización y gestión del agua en cultivos agrícolas.

2.2. Objetivos específicos

Caracterizar las curvas características de humedad del suelo a partir de la relación del contenido de humedad con la energía que es retenida, para evaluar la capacidad de retención y su variabilidad espacial.

Caracterizar las propiedades físicas del suelo utilizando análisis de laboratorio con el propósito de evaluar la capacidad de retención de humedad y su variabilidad espacial.

Generar funciones de pedotransferencia que permitan estimar el contenido de humedad del suelo, basadas en parámetros edafológicos medidos experimentalmente, para optimización de la programación del riego.

Evaluar la relación estadística entre el contenido de humedad de los resultados obtenidos por funciones de pedotransferencia y los datos experimentales de laboratorio.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L*) es un cultivo perenne C4, con tallos compuestos por nudos. Gramínea de gran importancia económica a nivel mundial, cultivada especialmente para la producción de azúcar, etanol y otros subproductos muy demandados. Su crecimiento y productividad dependen de factores como el clima, suelo, manejo agronómico y de las condiciones idóneas de humedad. Por su elevada producción de biomasa, el manejo del riego es indispensable para llegar a promedios altos de producción de caña (120 t/ha) y a un rendimiento promedio de azúcar (13,8t/ha) (Durman 2023; Figueroa *et al.* 2018).

3.2. Requerimientos hídricos del cultivo

Los requerimientos hídricos del cultivo oscilan entre 1200 y 1500 mm por año, dependiendo de factores climáticos, de suelo y de las prácticas de manejo (Durman 2023). Durante la etapa de rápido crecimiento (4 a 10 meses), es cuando se concentra aproximadamente el 60% del consumo total de agua por lo que un déficit hídrico en esta etapa puede reducir el rendimiento hasta en un 40 % (Figueroa *et al.* 2018).

3.3. Generalidades y función del riego

El riego es el aporte artificial de agua al suelo, para cubrir todas las necesidades hídricas de los cultivos para que ellos puedan expresar su potencial genético. Su función principal es proporcionar la suficiente humedad necesaria para el crecimiento de las plantas, favoreciendo el transporte de nutrientes y la disolución de sales en el suelo. Sin embargo, el riego también ayuda a regular la temperatura del suelo reduciéndola en verano, e impedir que las temperaturas bajen en invierno, contribuyendo frente a las heladas (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

3.4. Evapotranspiración de cultivo (ET_c)

La evapotranspiración (ET) está en función de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo donde ambos suceden al mismo tiempo. Sin duda que para determinar los requerimientos hídricos este parámetro es de mucho interés ya que indica la cantidad o volumen de agua que un cultivo puede perder en un día o en un área determinada; proporcionando información para decidir si se requiere de riego. Los resultados suelen expresarse en milímetros de agua (mm) por unidad de tiempo (hora, día, mes) (Allen *et al.* 2006).

3.5. Relación básica suelo-agua- planta

La relación suelo-agua-planta se basa en la transpiración que es la pérdida de agua en forma de vapor hacia la atmósfera a través de un gradiente de potencial entre la planta y la atmósfera, que mueve el agua desde zonas con mayor concentración hasta aquellas con menor concentración. El suelo actúa como un reservorio de agua, aire y nutrientes, los cuales las plantas extraen y su capacidad de almacenar agua depende de sus características físicas, y eso por eso que es importante entender la composición de los suelos y las fuerzas que influyen en la retención y el movimiento del agua (García *et al.* 2018).

3.6. Humedad en el suelo

El contenido de humedad del suelo se expresa como una proporción entre la masa de agua por volumen de suelo. Sus resultados pueden expresarse como porcentaje de peso o porcentaje de volumen. Si se lleva a cabo el cálculo de porcentaje en peso, estas expresiones están correlacionadas de forma lineal por la densidad aparente del suelo muestreado (Greacen, 1981 citado por García Coronado 2011).

3.6.1. Humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica se define como la cantidad de masa de agua en relación a las partículas de masa presentes en un suelo seco. “Suelo seco” se refiere al suelo que ha sido secado en un horno a temperaturas de 105 ° C; hasta llegar a un estado de equilibrio, esto puede variar de

acuerdo a la textura, como ocurre con las partículas más finas (arcillas) donde la humedad puede ser visible incluso a temperaturas más altas (Acosta y Avellaneda 2019).

Tabla 1. Capacidad de retención de humedad aprovechable en suelos con diferentes texturas.

Clase textural	Cm de agua/30 cm profundidad del suelo
Arena gruesa	1.0 a 2.0
Arena y migajón arenosa	2.0 a 4.0
Franco y franco limoso	4.0 a 5.5
Franco arcilloso, franco arcillo-limoso y franco arcillo-arenoso	4.5 a 6.2
Arcillo-arenoso, arcillo-limoso y arcilla	4.0 a 6.2

Fuente: Castellanos (2000)

3.6.2. Humedad Volumétrica

A la relación entre el volumen del agua y el volumen total o aparente del suelo mientras esta seco se define como humedad volumétrica. El contenido de humedad volumétrica, cuando está saturado, oscila entre 40 y 50 % en suelos arenosos, alrededor del 50% en suelos con textura media y aproximadamente del 60% en suelos arcillosos (Acosta y Avellaneda 2019).

3.7. Infiltración del agua en el suelo

La infiltración es un parámetro que describe la tasa de agua que logra entrar al perfil del suelo. Este parámetro es variable tanto en espacio como en tiempo, debido a que está influenciado por la textura, porosidad, densidad aparente, contenido de materia orgánica, contenido de humedad inicial, compactación del suelo, profundidad del manto freático, y uso del suelo, entre otros (Ávila-Dávila *et al.* 2019).

3.8. Estado energético de agua en el suelo

El estado energético es incluso más relevante que la cantidad de agua presente en el suelo, porque permite predecir cómo será su comportamiento ya que la energía presente influye directamente en el movimiento del agua. Hay diversas energías presentes en el agua del suelo por lo cual se miden y se expresan en unidades de potencial que es la energía por unidad de

masa. El agua del suelo está sometida a fuerzas de adhesión o también llamada adsorción, cuando el agua se agrega al suelo seco ya sea por lluvia o riego, se distribuye alrededor de las partículas del suelo, donde se mantiene por adherencia y fuerzas de cohesión (Universidad de Granada, c2010).

3.9. Potencial hídrico

El potencial hídrico no es más que la energía con la que el agua es retenida por las partículas coloidales del suelo. Las partículas aplican una fuerza determinada para retener o expulsar dicha agua influyendo en la absorción de agua por las plantas. Se les denomina potencial hídrico del suelo a estas fuerzas donde representan la cantidad de trabajo que se debe realizar para mover una unidad de masa de agua. Puede calcularse como trabajo dividido por peso o trabajo dividido por volumen (potencial de presión, que se expresa en Bares, atmosferas o Kpa) (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

El potencial hídrico total del agua del suelo está determinado por:

$$\Psi_{HT} = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_p + \Psi_o$$

- Potencial gravitacional (Ψ_g)
- Potencial mátrico (Ψ_m)
- Potencial presión (Ψ_p)
- Potencial osmótico (Ψ_o).

3.9.1. Potencial gravitacional

Es la parte potencial del agua que resulta de la fuerza de gravedad, por la cual cuando se suministra agua a un terreno seco, esta empieza de desplazarse hacia abajo debido a la influencia de la gravedad. La eliminación de los sobrantes de agua en el suelo es llevada a cabo gracias al potencial gravitacional siendo así positivo para los puntos que se encuentran por encima del rango de referencia y negativo para aquellos que están por debajo (Mauricio Loarte 2022).

3.9.2. Potencial osmótico

La presencia de solutos en el agua del suelo que afectan sus características termodinámicas están reguladas por el potencial osmótico. Surge cuando el agua es absorbida en presencia de membranas e influye a como las raíces de las plantas absorben el agua (Pascual y Pascual Seva 2020; García Coronado 2011).

3.9.3. Potencial matricial

Es la parte del potencial total que se debe a las fuerzas de atracción del agua por la superficie de las partículas sólidas del suelo, y a las fuerzas de atracción molecular entre las propias moléculas del agua. El conjunto de estos dos tipos de fuerzas hace que el agua sea retenida por adsorción (por la matriz del suelo) y por capilaridad (por las mismas moléculas de agua) en suelos con un contenido hídrico por debajo del nivel de saturación. El potencial mátrico es el más importante de los componentes del potencial total desde el punto de vista agronómico (García *et al.* 2018).

3.9.4. Potencial de presión

Mauricio Loarte (2022), explica que el potencial de presión es el volumen de trabajo que es necesario realizar por cada unidad de agua pura para trasladar, en forma isotérmica y reversible, una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito con una solución cuya composición es igual a la del suelo, bajo presión atmosférica, hasta el agua del suelo en el punto analizado.

3.10. Contenido de agua en el suelo

El suelo formado por tres fases fundamentales: 1) Fase sólida; 2) Fase líquida; 3) Fase gaseosa; donde en la física de suelos se define como un sistema polifásico, heterogéneo, poroso y disperso, que está constituido por partículas y con límites bien definidos. El agua puede acumularse en los espacios vacíos del suelo, que forman una red llamada porosidad, a raíz de su naturaleza tridimensional y porosa. Además, el agua tiene la capacidad de adsorberse a las superficies de las partículas individuales que componen el suelo, lo que implica cubrir las superficies de estos componentes en estado sólido (Hidalgo-Campos y Camacho-Umaña 2024).

3.10.1. Saturación

El punto de saturación de un suelo es cuando todos sus poros están llenos de agua, sin la capacidad de presencia de oxígeno. Esto se observa de inmediato después de una lluvia o un riego abundante. Se cree que el potencial mátrico o con que el agua es retenida por el suelo se sobreentiende que es igual a cero (Andriani 2018, citado por Mauricio Loarte 2022).

3.10.2. Capacidad de campo (CC)

La capacidad de campo de un suelo es la máxima cantidad de agua que es capaz de almacenar contra a la fuerza gravitacional, luego de una precipitación o un riego que ha humedecido por completo el suelo. Para suelos de textura arcillosa la capacidad de campo se encuentra a una tensión de $1/3$ de atmosfera, para los suelos francos $1/5$ de atmosfera y para los suelos arenosos $1/10$ atmosfera (Mauricio Loarte 2022).

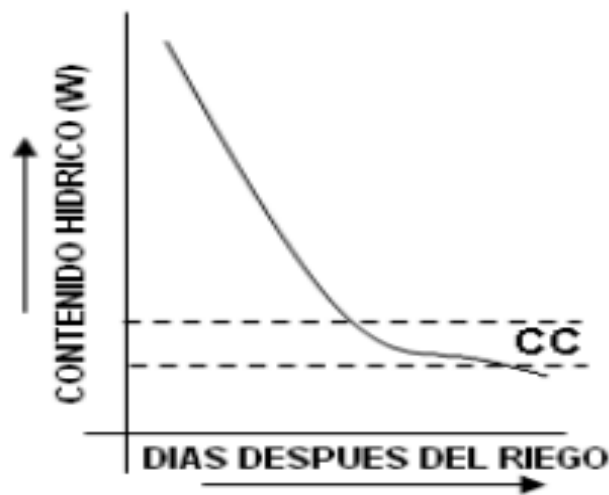


Figura 1. Curva de humedad del suelo con el punto de inflexión que determina la Capacidad de Campo (CC) del suelo después del riego.

Fuente: Assan y Gorosito (2018).

3.10.3. Punto de marchitez permanente (PMP)

Es cuando las raíces de las plantas no pueden extraer una molécula más de agua, es decir es el rango límite de extracción de agua por parte del cultivo. Contenido de humedad del suelo a partir del cual la planta empieza a marchitarse de manera permanente y pese a estar en un ambiente saturado de vapor de agua (humedad ambiental al 100%), no vuelve a recuperarse. Según Assan y Gorosito (2018), se considera la humedad retenida a -15 bares para fines prácticos.

3.10.4. Agua aprovechable

El agua aprovechable disponible para las plantas es la diferencia entre el límite mínimo de extracción (PMP) y el límite máximo (CC), donde se forma un intervalo en el cual es posible que la planta absorba agua (Assan y Gorosito 2018).

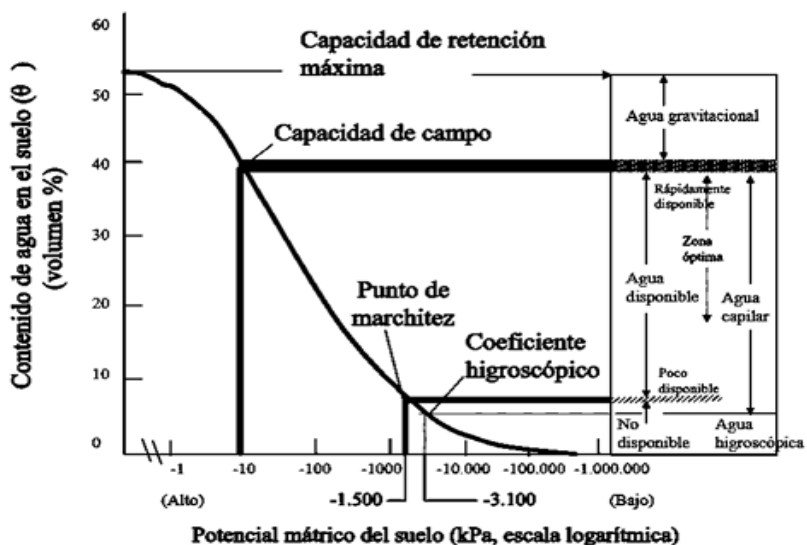


Figura 2. Esquema de las constantes hídricas del suelo.

Fuente: Assan y Gorosito (2018).

Fórmula para calcular el agua disponible:

$$\%H = CC - PMP$$

Donde:

%H: Porcentaje de humedad disponible

CC: Capacidad de campo en %

PMP: Punto de marchitez permanente en %

3.11. Curva de retención de humedad del suelo

Comúnmente se le llama curva de retención de humedad, aunque en ocasiones se le denomina curva característica de humedad y no es más que la relación que existe entre el potencial matricial del suelo (ψ_m o h) y el contenido de humedad (θ) donde se expresa como $\theta(h)$. Otras denominaciones son también curvas pF con la diferencia que la humedad se gráfica en función del logaritmo del potencial matricial (García Coronado 2011). La CRHS está influenciada principalmente por cómo se distribuyen los tamaños de los poros, como interactúan la materia orgánica, el contenido de arcilla (textura) y la mineralogía de las arcillas (Hillel, 1998 citado por García Coronado 2011).

En la Figura 3; se muestra la curva de retención de humedad del suelo. Muestra que, a saturación (θ_s , potencial cero), todos los poros están llenos de agua. Al descender la humedad por gravedad, se alcanza el potencial de entrada de aire, que define la capacidad de campo. El agua almacenada entre la saturación y este punto ocupa los poros más grandes y es la menos retenida (García Coronado 2011).

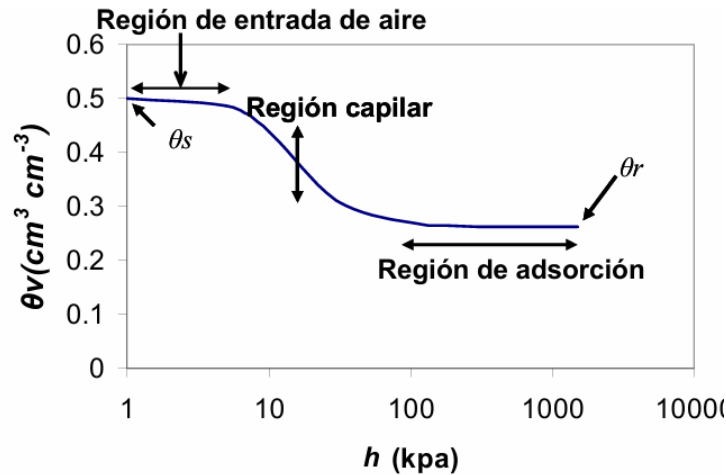


Figura 3. Curva de retención de humedad del suelo.

Fuente: García Coronado (2011).

3.11.1 Antecedentes históricos de la CRHS

Las curvas de retención de humedad son utilizadas para entender la dinámica de las propiedades hidráulicas de los suelos, como ser la conductividad hidráulica, la infiltración, el drenaje y el movimiento de sólidos. Todo esto brinda información clave acerca de cómo se comportan los suelos saturados, parcialmente saturados y no saturados (Meza Ochoa 2012).

Métodos primitivos utilizaban muestras modificadas, como se dio en Cuba donde se hicieron los primeros estudios haciendo uso de la prensa de Richards (Carrillo 1980), su determinación ha ido evolucionando. En 1986, se logró un avance importante al implementar una caja de arena en el instituto de investigaciones de Riego y Drenaje. Esto permitió que por primera vez se lograran examinar muestras sin alterar y llevar a cabo un análisis detallado del área húmeda, lo cual es fundamental para planear el riego. Al mismo tiempo, surgieron modelos analíticos que posibilitan calcular de forma indirecta la conductividad hidráulica. Estos van desde la relación potencial de Brooks y Coray (1964) hasta la ecuación flexible de Van Genuchten (1980).

Para estimar parámetros hidráulicos basándose en los atributos fundamentales del suelo, como lo evidenciaron las primeras investigaciones de Ferrasoles en Cuba (Medina *et al.* 2000), se han utilizado funciones de pedotransferencia debido a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Sin embargo, la validez de estas funciones depende del contexto edáfico en el que se desarrollaron, por lo cual necesitan una calibración y validación local específicas (Schaap y Leij, 1998).

3.11.2. Métodos para determinar la humedad del suelo

En la actualidad se emplean métodos directos como indirectos para determinar las propiedades hidráulicas de los suelos, ya que esto resulta una de las labores más complejas y que más tiempo requiere en el ámbito de la física del suelo. García Coronado (2011), sostiene que a partir de muestras inalteradas ambos métodos proveen descripciones precisas de las funciones $\theta(h)$ y $K(\theta)$ siendo muy efectivos.

a. Método directo (gravimétrico)

El método gravimétrico es el único método directo para medir la cantidad de humedad en el suelo, donde consiste en tomar una muestra directamente del suelo, esta se debe pesar antes y después de su secado y proceder a calcular su contenido de humedad. Cabe recalcar que la muestra de suelo se determina seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C que normalmente se da a las 24 horas después de haberla puesto a calor en estufa (Arango, 2020).

Determinación del contenido de humedad gravimétrico (w)

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100\%$$

Donde:

w = Contenido de humedad gravimétrico (%)

P_h = Peso de la muestra húmeda (g)

P_s = Peso de la muestra seca (g)

b. Métodos en laboratorio

En laboratorio tenemos la oportunidad de calcular el contenido de humedad del suelo gracias a equipos y modelos que nos ayudan a hacer análisis precisos y confiables para facilitarlos futuras tomas de decisiones. Algunos de estos métodos son:

- **Olla de presión Richards**

L. A. Richards en 1930 estableció el plato de presión, se dice que en realidad el equipo no mide el potencial hídrico de una muestra, lo que hace es llevar la muestra a un potencial hídrico definido mediante la aplicación de presión a la muestra, esto permite que el exceso de agua fluya hacia fuera a través de un plato de cerámica poroso. El potencial hídrico será equivalente a la presión aplicada cuando la muestra llega al equilibrio (Enciso Vargas *et al.* 2018).

Los platos de presión se utilizan en el laboratorio para hacer curvas características de humedad del suelo. El investigador puede sacar la muestra de la olla para secarla y medir su contenido de humedad después de que la muestra haya alcanzado un potencial específico de agua a presión. Para elaborar una curva característica de humedad del suelo es necesario aplicar y medir diferentes presiones en el aparato de placa de presión (Enciso Vargas *et al.* 2018).



Figura 4. Extractor (olla presión) y plato cerámica

Fuente: Enciso Vargas *et al.* (2018).

- **Modelos analíticos para la CRHS**

Para elaborar la curva característica de humedad del suelo normalmente se cuenta con una cantidad reducida de puntos medidos debido al trabajo de campo y laboratorio, agregando a esto la inversión que se requiere. Gracias al avance de la tecnología se han desarrollado modelos analíticos que nos permiten determinar la curva característica de humedad, comparando las propiedades de los suelos e interpolando datos que no se tienen para desarrollar el modelo de flujo de la zona no saturada (Acosta y Avellaneda 2019).

Van Genuchten en (1980) propuso una relación entre succión y el contenido de agua normalizada, en el que se requieren tres parámetros de ajuste de suelo que son a , n y m . El modelo más usado en el mundo y el que mejor se ajusta a los datos obtenidos en campo es el modelo de Van Genuchten (1980) (Garcia Coronado 2011).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + ah^n]^m}$$

Donde:

θ = contenido de humedad del suelo (cm^3/cm^3)

θ_r = contenido de humedad residual del suelo (cm^3/cm^3)
 θ_s = contenido de humedad de saturación de suelo (cm^3/cm^3)
 h = potencial hídrico del suelo (kPa).
 α = parámetro de escala inversamente proporcional al diámetro medio del poro.
 n y m = parámetros de forma de la característica del agua del suelo, siendo $m = 1-1/n$.

Esta ecuación se define como un modelo empírico muy usado en hidrología de suelos. Este modelo ajusta con precisión la curva característica de humedad en condiciones no saturadas a partir de parámetros que reconocen la variabilidad estructural y textural.

c. Método indirecto

Estos métodos consisten en determinar la cantidad de humedad del suelo mediante una propiedad física relacionada. Después se procede a convertir la medición en un número que representa la humedad, haciendo uso de fórmulas de calibración, sin extraer ni alterar el agua presente en el suelo. Su aplicación permite obtener mediciones rápidas y prácticas en diferentes condiciones de campo. La precisión de los resultados depende de las características del suelo y de la calibración utilizada para cada método.

Entre los principales métodos indirectos utilizados para determinar la humedad del suelo se encuentran la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), los tensiómetros, la sonda de neutrones y los bloques de yeso. Cada uno se basa en una propiedad física diferente y presenta características particulares en cuanto a procedimiento, principio de medición, precisión y condiciones de uso. En el Cuadro 1 se describen los principales métodos indirectos empleados para la determinación de la humedad del suelo.

Cuadro 1. Tipos de métodos indirectos para determinar la humedad del suelo

Método	Procedimiento	Qué mide	Observaciones
TDR	Se introducen varillas de metal en la tierra. Se mide el tiempo de reflexión desde el final de las varillas después de que un generador emite un pulso electromagnético.	Tiempo de propagación de onda electromagnética (vinculado con la constante dieléctrica aparente).	- Ajuste requerido para suelos orgánicos y arcillosos. - Precisión alterada por temperaturas debajo de 0°C. - Necesita un buen contacto entre la sonda y el suelo.
Tensiómetros	Se entierra una cápsula de cerámica porosa que contiene agua y está vinculada a un manómetro. El suelo absorbe agua, generando un vacío parcial que se puede medir.	Tensión con la que el agua es retenida por el suelo.	- De rango limitado. - Dar mantenimiento semanalmente - Con el paso del tiempo, la cerámica se deteriora. - La interpretación necesita de una curva de retención de humedad.
Sonda de Neutrones	Se coloca una sonda radiactiva en un tubo de acceso. Los neutrones emitidos son diseminados por núcleos de hidrógeno y un dispositivo de detección contabiliza los neutrones "ralentizados".	Cálculo de neutrones térmicos (que es proporcional a la densidad de átomos de hidrógeno).	- Ajuste calibrado necesario para cada clase de suelo. - Tamaño de medición grande (cerca de 30 cm diámetro) - No hace distinción entre agua libre y estructural.
Bloques de yeso	Ubicar los electrodos dentro del bloque de yeso. Cuando este se satura y se coloca en el suelo, permite que la humedad del yeso salga y se empareje con el contenido de humedad.	Conductividad del material poroso saturado resistencia eléctrica (Ω).	- Respuesta tardía ante variaciones de humedad (histéresis). - Muy impactado por la salinidad del terreno - Las medidas pueden ser afectadas por la temperatura. - Calibración para cada serie de bloques.

Fuente: Elaboración propia

d. Técnicas para la estimación de las propiedades hidráulicas

Según Zambrano Navarrete *et al*, (2021), las distintas labores culturales provocan una mayor degradación física de los suelos y es por eso que se han desarrollado nuevas técnicas para generar información sobre las propiedades hidráulicas. Una de estas técnicas es la siguiente:

- Funciones de pedotransferencia (PTFs)

Estas relaciones o funciones de pedotransferencia (PTF) han sido desarrolladas en su mayoría para predecir propiedades hidráulicas del suelo, lo cual está relacionado con la importancia que se les concede a estas propiedades (García Coronado 2011). Estas funciones se estiman a partir de información básica (López Rodríguez *et al*. 2016), como la clasificación textural, densidad aparente, contenido de materia orgánica y distribución de tamaño de partículas, información topográfica o propiedades mecánicas (Mauricio Loarte 2022).

3.12. Relación entre la CRHS y otras propiedades del suelo

La estructura de un suelo como su composición es un factor que influye en la capacidad de retención de humedad. En lo siguiente se analiza la conexión de la CRHS y otras propiedades del suelo, sin embargo, resulta muy difícil relacionar el grado de retención al cómo se comporta una propiedad, es decir sin tomar en cuenta la interrelación que existe entre ellas (García Coronado 2011).

3.12.1. Textura del suelo

La textura del suelo no es más que el tamaño de partículas presentes en el suelo siendo estas: arcilla, limo y arena, agrupándose en suelos de textura fina, media y gruesa (Flores Delgadillo y Alcalá Martínez 2010). La función de la textura es la retención de humedad está relacionada con la estructura. Los suelos menos estructurados son los de textura más gruesa (arena) y tienen menor capacidad de retener humedad, a diferencia de los de textura más fina (arcilla) que retienen mucha humedad (García Coronado 2011).



En la tabla 2 se observan ciertos rangos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez en función de la clase textural del suelo.

Clase textural	C.C. (% en peso)	P.M. (% en peso)
Arena	9 (5-16)	4 (2-6)
Franco arenoso	14 (10-20)	6 (4-8)
Franco	22 (15-30)	10 (8-12)
Franco arcilloso	27 (25-35)	13 (11-15)
Arcilla limosa	31 (27-40)	15 (13-17)
Arcilla	35 (30-70)	17 (15-19)

20

3.12.2. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica presente en el suelo cumple funciones muy importantes influyendo en una buena estructura del suelo provocando una mayor porosidad que por ende resulta en una mejor capacidad del suelo para retener humedad. Su alta densidad de cargas, su área de superficie y la afinidad por el agua se relacionan y favorecen a otras propiedades del suelo, contribuyendo a la disponibilidad de nutrientes, resistencia a procesos erosivos, capacidad de intercambio catiónico (CIC), infiltración y otros. La íntima relación entre la MO y la estructura hace que esta propiedad influya en el rango de humedad de la curva de retención (García Coronado 2011).

3.12.3. Densidad aparente

Una de las propiedades del suelo que más afectan las propiedades hidráulicas y procesos relacionados es la densidad aparente del suelo, siendo así una de las propiedades más influyentes en la retención de humedad. La CRHS se ve afectada por la densidad aparente debido a la distribución del tamaño de poros donde estos responden al incremento rápido del movimiento relativo de los agregados del suelo. La labranza convencional de los suelos y la nula rotación de cultivos disminuyen el porcentaje de poros (García Coronado 2011).

Tabla 3. Propiedades físicas de suelos con diferentes texturas no compactados

Textura	Densidad aparente (mg/m ³)	Porosidad (%)
Arenosa	1,65 (1,55 – 1,80)*	38 (32 – 42)
Franca	1,40 (1,35 – 1,50)	47 (43 – 49)
Franco arcillosa	1,35 (1,30 – 1,40)	49 (47 – 51)
Arcillosa	1,25 (1,20 – 1,30)	53 (51 – 55)

Nota: Valores en paréntesis son los rangos*

Fuente: (Castellanos 2000)

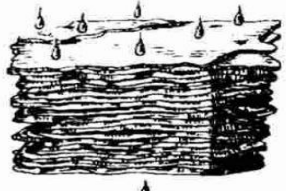
3.12.3. Estructura del suelo

La estructura del suelo se define como la forma en que las partículas del suelo están ordenadas entre sí, unidas de manera natural. Además, es un factor esencial en la retención hídrica del suelo, aunque resulta extremadamente complicado poder caracterizar. La floculación y cementación forman parte de los dos principios de la estructura de un suelo. Los agregados del suelo, que suelen ser característicos de suelos con abundante arcilla y materia orgánica, son esenciales para el movimiento y circulación de agua, gas o solutos. Estos mejoran la infiltración, el almacenamiento y la aireación. Al mismo tiempo disminuyen la erosión, la escorrentía y la evaporación (García Coronado 2011).

La estructura del suelo también influye en la distribución y continuidad de los poros, los cuales determinan el movimiento y almacenamiento del agua dentro del perfil. Los poros de mayor tamaño favorecen la infiltración y el drenaje, mientras que los poros pequeños contribuyen a la retención del agua y a su disponibilidad para las plantas. Por ello, las características estructurales del suelo pueden generar diferencias en el comportamiento del agua, incluso entre suelos que presentan una textura similar. Esta relación es importante para la caracterización de las propiedades hidráulicas, debido a que la distribución y continuidad de los poros determinan la cantidad de agua que puede permanecer retenida en el suelo a diferentes niveles de tensión.

Asimismo, la estabilidad y el tamaño de los agregados pueden verse afectados por factores como el contenido de materia orgánica, la actividad biológica, el manejo del suelo y la compactación. Estas modificaciones pueden alterar la distribución de los poros y, en consecuencia, la capacidad del suelo para retener y transmitir agua a diferentes niveles de tensión.

Cuadro 2. Clasificación de la textura del suelo

Estructura del Suelo	Descripción
GRANULAR 	Relativamente no porosos: agregados pequeños (tamaño menor de 2 cm de diámetro), referenciales, en situados a los agregados adyacentes. Se localizan comúnmente en el horizonte "A".
 MIGAJÓN (MUY POROSA)	Estructura relativamente porosa con agregados pequeños y referenciales que no están alineados con los agregados cercanos. Comúnmente se ubican en el horizonte "A".
BLOCOSA 	Bloques limitados por otros agregados cuyas caras angulares bien definidas, forman el molde de estos. Los agregados a menudo se rompen en bloques más pequeños. Se localizan generalmente en el horizonte "B".
	Gánulos similares a bloques limitados por otros agregados, cuyas caras angulares reconocidas forman el molde del granulo. Se localiza generalmente en el horizonte "B".
 COLUMNAR (CÚSPIDES REDONDEADAS)	Agregados similares a columnas con las partes superiores no redondeadas. Otros agregados forman el molde de la piel. Algunos agregados prismáticos se rompen en pedis de bloques más pequeños. Se localizan generalmente en el horizonte "B".
PRISMÁTICA 	Se caracterizan elementos verticales de los agregados en posición "C" y "D", incluidos los elementos horizontales. Las columnas correspondientes en ellas deben ser constantes mientras los elementos horizontales deben ser constantes. En este caso, los columnas son redondeadas y se encuentran muy a menudo en el horizonte "B", en suelos alcalinos (sólidos).
LAMINAR 	Agregados similares a placas: las dimensiones verticales de los agregados no posición natural son marcos que se suministran horizontales. Las placas a menudo se superponen e impiden la permeabilidad. Se encuentran generalmente en el horizonte "A2", en suelos de bosques y estantes ambientes.

Fuente: FAO (2022)

En la estructura las arcillas y la materia orgánica son los encargados de aglutinar los componentes) del suelo. Para un buen aprovechamiento de riego la estructura debe de ser granular, la estructura laminar dificulta mucho la circulación del agua (García Coronado 2011).

3.12.4. Porosidad del suelo

Según FAO (2022), al porcentaje de volumen del suelo que está libre de sólidos se le determina espacio poroso. En términos generales el volumen del suelo está compuesto por un 50% de materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y de otro 50 % que corresponde al espacio poroso. Es posible identificar macro poros y micro poros dentro del espacio poroso, en los que el aire, los nutrientes, el agua y los gases tienen capacidad de moverse o quedar retenidos. La fuerza gravitatoria provoca que los macro poros no sean capaces de mantener agua, pero cumplen funciones importantes como drenar, airear el suelo e influir en el espacio para la formación de raíces, en cambio los micro poros son capaces de almacenar agua, de la cual una fracción está disponible para las plantas.

Tabla 4. Valores orientativos de la porosidad total de un suelo y su interpretación

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 – 40	Baja
40 – 50	Media
50 – 60	Alta
> 60	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

3.13. Importancia de las curvas de retención de humedad en la agricultura

Sin duda alguna que las curvas de retención de humedad cumplen labores muy importantes en la agricultura ya que los científicos las emplean para entender la dinámica del agua en el suelo bajo ciertas condiciones de humedad. Las CRHS dan respuesta idónea a interrogantes que muchos agricultores hoy se preguntan, por ejemplo: ¿Cuál es la cantidad de humedad presente en el suelo que provoca marchitamiento permanente? “¿Por cuánto tiempo regar el cultivo?” o con qué rapidez el agua se drenará en el suelo o si quedara retenida en la zona radicular? Es por

eso que las CRHS es información potente que se emplean para anticipar la filtración de agua en el suelo, la escorrentía, el drenaje profundo y mucho más (Fresneda Saldarriaga 2019).

De las preguntas más frecuentes de un agricultor es con qué regularidad regar su cultivo, y es ahí donde una curva de retención de humedad puede ayudar a responder esa interrogante. Pero para ello se debe saber el potencial hídrico como su volumen volumétrico del agua. El contenido volumétrico le dice al agricultor la lámina o cuanto de riego debe aplicar. La disponibilidad de agua para las plantas y el momento en que dejar de regar se reflejan en el potencial hídrico (Fresneda Saldarriaga 2019).

En pocas palabras la capacidad que tiene el suelo para poder almacenar agua bajo distintas tensiones es explicada por la curva de retención de humedad, proporcionando información precisa para determinar el volumen de riego y el agua disponible para las plantas, donde se sitúa entre el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC) (Vélez 2021).

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1. Ubicación

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Riegos y Suelos de la Universidad Nacional De Agricultura (UNAG), ubicada entre las coordenadas geográficas 14° 50' 22" latitud norte, 85° 52' 32" latitud oeste, a 6 Km sur este de la ciudad de Catacamas, Olancho, Honduras, C.A.

Textura,

La fase de campo, se desarrolló en fincas de la Compañía Azucarera Tres Valles (CATV), ubicada en el municipio de San Juan de Flores, Francisco Morazán, Honduras, ubicada a 14° 10' 0.01" O, 86° 58' 0.01" E, a una altitud media de 625 msnm (Earth Google)

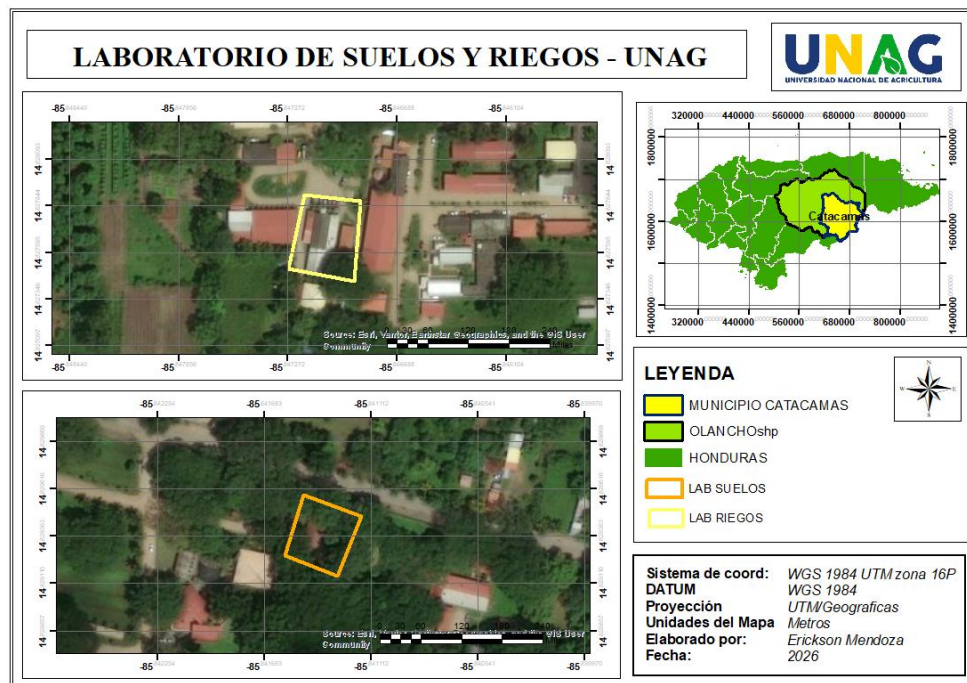


Figura 6. Ubicación laboratorio Riegos y Suelos, Universidad Nacional De Agricultura

Fuente: Elaboración propia

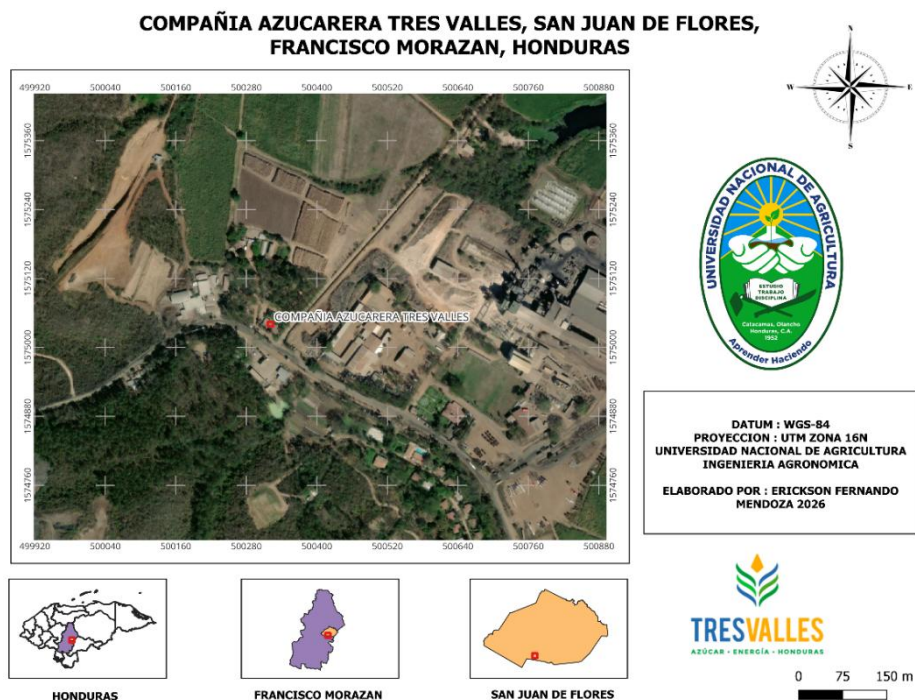


Figura 4. Ubicación de la Compañía Azucarera tres Valles (CATV)

Fuente: Elaboración propia

Características climáticas de la zona

Donde se realizó la fase de campo se presentan las siguientes condiciones climáticas:

Precipitación: 1,493 mm

Humedad relativa: 68%

Temperatura: 34 °C.

4.2. Materiales y equipo

Para el trabajo de investigación se utilizó los siguientes materiales y equipos divididos en cuatro categorías:

-Equipo de campo:

Cilindros muestreadores modelo tipo 0200, kit muestreador (soil moisture), azafate para cortar las muestras, navaja, cinta métrica, bolsas plásticas, masking tape, pala, libreta de campo y marcador (Anexo 1 y Anexo 2).

-Equipo de laboratorio:

Olla de Richards, placas de cerámica porosa (1 bar, 3 bar, 5 bar, 15 bar), balanza de precisión (0.01g), compresor de aire con regulador, espátula, bandeja para saturar muestras, agua destilada y estufa (Anexo 3 y Anexo 4).

-Equipo de cómputo y software:

Computadora, SIG (Qgis), Software estadístico (R), Software estadístico (SAS) RETC, Microsoft Excel y Microsoft Word (Anexo 16 y Anexo 17).

-Materiales:

Muestras de suelo indisturbadas e disturbadas y papel filtro.

4.3. Diseño y enfoque de investigación

Se realizó una investigación cuantitativa con un diseño no experimental, tipo transversal, correlacional-predictivo. Las propiedades hidráulicas del suelo fueron caracterizadas mediante técnicas de laboratorio, métodos de modelación matemática y análisis geoestadístico. Se realizó muestreo estratificado y georreferenciado a diferentes profundidades para analizar la variabilidad espacial de las curvas de retención de humedad. Para ajustar los datos y construir modelos predictivos aptos para la gestión eficiente del agua en los sistemas agrícolas, se empleó el modelo de van Genuchten en combinación con funciones de interpolación espacial y de pedotransferencia.

4.4 Procedimiento

El trabajo de investigación se desarrolló en cuatro fases que abarcaron desde la planificación hasta el análisis de datos. El proceso garantizó la representatividad de las muestras mediante la recolección de muestras indisturbadas. El proceso completo se esquematiza en el cuadro 4, donde se desglosan las siguientes fases:

- Fase preliminar
- Fase de campo
- Fase de laboratorio
- Fase de análisis estadístico

Cuadro 3. Resumen de cada fase ejecutada

Fase	Actividades Clave	Materiales / Equipos	Producto Obtenido
Fase Preliminar	- Se realizó análisis con SIG para la planificación usando información de suelos y lotes. - Se definieron los puntos de muestreo en las fincas y lotes de interés, considerando la ubicación de los tensiómetros instalados y las condiciones de las áreas seleccionadas.	Software de sistema de información geográfica (SIG), GPS y formatos de campo.	Distribución espacial de los puntos de muestreo y registro georreferenciado de los sitios seleccionados.
Fase de Campo	- Se recolectaron muestras indisturbadas y disturbadas. - Se registraron y georreferenciaron los datos en el lugar.	Masking tape, bolsas, Kit muestreador y cilindros para muestras indisturbadas.	Muestras indisturbadas y disturbadas correctamente identificadas y almacenadas.
Fase de Laboratorio	- Aplicación de presiones mediante ollas Richards. - Humedad gravimétrica - Análisis físico de: - Densidad aparente. - Textura. - Materia orgánica. - Porosidad - Densidad real - Conductividad eléctrica	Balanza de precisión, olla de presión Richards, estufa, espátula y papel filtro.	Tabla con información sobre la tensión matricial en relación al contenido de humedad. Resultados de los análisis sobre las propiedades físicas
Fase de Análisis estadístico	- Construcción de las curvas de retención de humedad - Ajuste de las curvas de retención con el modelo van Genuchten. - Análisis con R para determinar constantes de humedad del suelo. - Tabulación de los parámetros hidráulicos del modelo de van Genuchten. - Validación de funciones de pedotransferencia para estimar el contenido de humedad a partir de las propiedades físicas del suelo.	Software (Excel, RETC, R), modelos de ajuste (van Genuchten).	Curvas de retención ajustadas, parámetros hídricos, informe final.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Variables medidas, simbología, método de determinación y unidades.

Variables relacionadas con la física del suelo			
Variable medida	Símbolo	Método	Unidad
Distribución del tamaño de partícula	DTP	Método de Bouyoucos	–
• Arena, Limo y Arcilla de acuerdo con el modelo de la USDA	Arena Limo Arcilla		%
Densidad aparente	ρ_a	Método del cilindro	g./ cm ⁻³
Densidad real	ρ_r	Matraz aforado	g./ cm ⁻³
Materia orgánica	MO	Walkley and Black	%
Porosidad total	ϕ o n	Mediante D_a y D_r	%
Conductividad eléctrica		Dilución suelo:Agua (1:5)	
Variables relacionadas con la hidráulica del suelo			
Potencial mátricial	KPa	Olla de presión Richards	
• Humedad volumétrica	%		cm ³ /cm ³
• Coeficientes de acuerdo al modelo analítico de van Genuchten (1980)	θ_s y θ_r	Ajuste no lineal (RETC)	cm ³ /cm ³
	α		cm ⁻¹
	n		–
Variables hidráulicas derivadas			
Capacidad de campo (0.33 bar)	CC		cm ³ /cm ³
Punto de marchitez permanente (15 bar)	PMP		cm ³ /cm ³
Agua disponible	AD	Cálculo (CC – PMP)	cm ³ /cm ³

Fuente: Elaboración propia

4.5. Fase preliminar

Esta fase comprendió las actividades iniciales de planificación y organización del muestreo, mediante la recopilación de información y el uso del software SIG (QGIS), para definir los puntos de muestreo en las áreas de estudio.

Recopilación de información y uso de SIG

Para esta fase se implementó la metodología planteada por Loarte (2022), desarrollada en un trabajo realizado en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), la cual integra el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la planificación y organización del muestreo.

Las actividades desarrolladas para esta etapa fueron las siguientes:

- Se realizó la selección de los puntos de muestreo en las fincas y lotes de interés considerando el tipo de textura y la ubicación de los tensiómetros instalados en cada punto seleccionado a muestrear.
- Se seleccionaron 30 puntos de muestreo distribuidos en distintas fincas. En cada finca, los puntos fueron seleccionados dentro de un lote en específico.
- Se creó en QGis la distribución espacial de los puntos de muestreo para apoyar la planificación y organización de la información georreferenciada.

4.6. Fase de campo

Esta fase comprendió las actividades de muestreo y recolección de suelo, incluyendo la toma de muestras indisturbadas y muestras destinadas a la determinación de las propiedades físicas del suelo, así como su identificación, conservación y transporte para el posterior análisis en laboratorio.

4.6.1. Muestreo en campo

- El muestreo se realizó haciendo uso de Qgis lo que permitió garantizar la representatividad espacial de las muestras y su correcta georreferenciación. La toma de muestras se realizó bajo condiciones de humedad cercanas a capacidad de campo, siguiendo el protocolo establecido por García Coronado (2011), para estudios de caracterización hidrofísica en suelos agrícolas.
- Las muestras de suelo se tomaron a dos profundidades estratificadas: 0–20 cm y 20–40 cm, en distintas fincas de la Compañía Azucarera Tres Valles. La elección de las profundidades se basó en la metodología establecida en estudios de dinámica hídrica en caña de azúcar realizados en La Habana, Cuba (Romero Campos *et al.* 2020). Esta zonificación coincide con la distribución radicular activa del cultivo, la cual se concentra entre el 80 y 90% de la absorción hídrica en los primeros 40 cm de profundidad (Nath, 2014; Figueroa *et al.* 2018).
- La selección de la primera profundidad (0-20 cm) responde a la constante variabilidad espacio temporal en la retención de humedad de los primeros centímetros del suelo, originada por el excesivo laboreo, las actividades agrícolas y los constantes ciclos de humedecimiento y secado (García Coronado 2011). La segunda profundidad (20-40 cm), además de ser relevante para el cultivo de caña de azúcar, proporciona un mayor rango de variación de las propiedades físicas e hidráulicas, lo que permitió capturar una mayor variabilidad y mejorar la eficiencia predictiva de las funciones de pedotransferencia (PTFs) desarrolladas (García Coronado 2011).

4.6.2. Toma de Muestras Indisturbadas

- La toma de muestras indisturbadas se realizó siguiendo la metodología planteada por Rios Morantes (2023), desarrollada en la Universidad, Zamorano, Honduras. Para la recolección de estas muestras se utilizó el Kit Muestreador de Suelo “Soil Core

Sampler” (Model 0200) utilizando cilindros de volumen estandarizado de 76.6 cm³ (Soilmoisture Equipment Corp. 2017).

- Se realizaron alrededor de 30 puntos de muestreo en fincas previamente seleccionadas, con el propósito de obtener una representación adecuada de las condiciones del suelo en el área de estudio. En cada punto se realizó el muestreo a dos profundidades (20 cm y 40 cm), considerando dos repeticiones por cada profundidad de muestreo. En total se recolectaron 120 muestras indisturbadas para su posterior análisis en laboratorio.
- Además de las muestras destinadas para el análisis de curvas características de humedad (muestras indisturbadas), se realizó un muestreo adicional para la determinación de las propiedades físicas del suelo. Este muestreo se llevó a cabo en los mismos puntos donde se recolectaron las muestras indisturbadas, aprovechando la misma georreferenciación establecida en cada punto de muestreo.

Observación:

Durante la toma de muestras indisturbadas, se verificó que cada cilindro contuviera únicamente suelo inalterado. Las muestras con exceso de raíces, rocas u otros materiales ajenos al suelo fueron descartadas y extraídas nuevamente para garantizar la calidad de los análisis de laboratorio. Además es importante considerar sacar las muestras en dirección vertical al perfil del suelo favoreciendo la naturaleza de sus poros (Anexo 5 y Anexo 6).

4.6.3. Tratamiento y transporte de las muestras de suelo

- Una vez extraídas las muestras utilizando los cilindros, posteriormente fueron etiquetadas con un código correspondiente (incluyendo finca, lote, punto de muestreo, profundidad y número de repetición). Una vez identificada la muestra fue envuelta con papel resinite con la finalidad de protección y conservación durante el transporte. Las muestras se almacenaron temporalmente en cajas rígidas con separadores para evitar vibraciones o compactación durante el traslado.

- Las muestras fueron trasladadas desde la Compañía Azucarera Tres Valles hasta al laboratorio de Riego y al laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agricultura para su posterior análisis.

Los procedimientos generales para el tratamiento de las muestras tomadas en campo se realizaron conforme al protocolo de conservación y transporte de muestras inalteradas descrito por Acosta y Avellaneda (2019).

4.7. Fase de laboratorio

El análisis de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo se realizó siguiendo protocolos estandarizados que combinan normativas internacionales y procedimientos especializados para muestras de suelo.

4.7.1. Textura del suelo

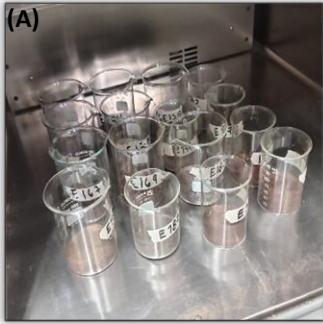
La textura del suelo se determinó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Olancho, siguiendo el método de Bouyoucos, basado en la ley de Stokes (Beretta *et al.* 2014). Esta ley establece que las partículas de mayor tamaño sedimentan más rápido en agua (Klute 1986).

En la Figura 7 se observa un esquema metodológico que resume las principales etapas desarrolladas para la determinación de la textura del suelo. El procedimiento comprendió la preparación y dispersión de la muestra, el proceso de sedimentación, la realización de las lecturas correspondientes y, finalmente, la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla para establecer la clase textural del suelo mediante el triángulo textural del USDA.

DETERMINACION DE LA TEXTURA DEL SUELO METODO DE BOUYOUCOS

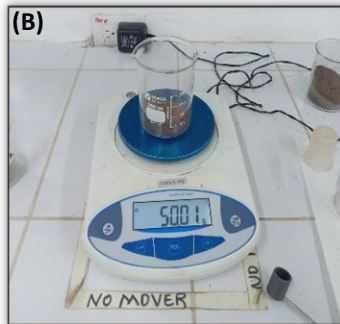
PREPARACION Y DISPERSION DE LA MUESTRA

SECADO



Secar 60 g (75-80°C, mín. 6h) ya tamizado (2mm)

PESAJE



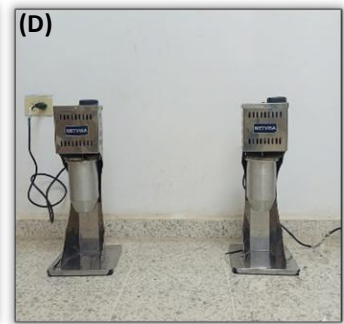
Pesar 50 g muestra seca en Beaker 250 ml

APLICACIÓN DE REACTIVOS



100 ml agua + 10 ml de dispersante ($\text{NaPO}_3)_6$ + 12 h de reposo

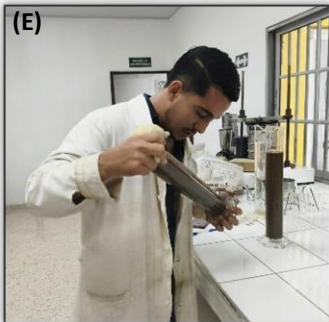
BATIDO MECANICO



Verter en la batidora eléctrica por 10 min

MEDICION, SEDIMENTACION Y RESULTADOS

AGITACION



Agitar por 1 min (añadir alcohol si hay espuma)

LECTURA 40 SEGUNDOS



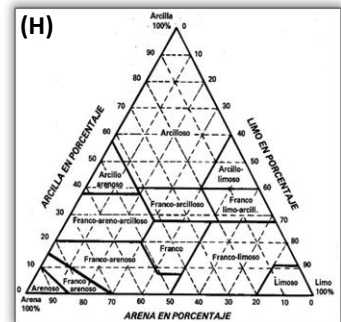
Introducir el hidrómetro 40 seg → partículas de limo + arcilla en suspensión

LECTURA 2 HORAS



Introducir el hidrómetro 2 h → solo partículas de arcilla en suspensión

CLASIFICACION TEXTURAL



Calcular el porcentaje de limo, arena y arcilla. Posteriormente determinar la clase textural mediante el triángulo textural del USDA

Figura 7. Procedimiento para el análisis de la textura del suelo mediante el método de Bouyoucos.

Fuente: Elaboración propia

Esta elección metodológica permitió la cuantificación precisa de fracciones de arena, limo y arcilla, fundamentales para lo que fue la caracterización hidrofísica del suelo y para el desarrollo de funciones de pedotransferencia locales (Flores Delgadillo y Alcalá Martínez 2010).

4.7.2. Materia orgánica

La siguiente Figura X muestra de manera resumida la metodología utilizada para la determinación del carbono orgánico del suelo mediante el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio en medio ácido (Walkley & Black, 1934). Es el método más utilizado en los laboratorios edafológicos para evaluar la materia orgánica del suelo (Ruiz Dager *et al.* 2018).

ANÁLISIS DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO MÉTODO WALKLEY AND BLACK

PREPARACION Y REACCION INICIAL

1 Pesaje Diferenciado de Muestras



Suelos Orgánicos / Oscuros → 0.5 g
Suelos Arenosos / Claros → 1 g



2 Reactivos y Agitación



Añadir 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ y 20 ml de H_2SO_4 concentrado

3 Reposo y Dilución



Dejar enfriar 30 min → Añadir 200 ml de agua destilada → Reposar otros 30 min

TITULACION Y RESULTADOS

4 Preparación para Titular



Adicionar 4 gotas de Ferrioina 0.025M

5 Titulación con sulfato ferroso



Sulfato Ferroso 0.5 N (Método Eyherabide *et al.*, 2014)

6 Identificación Del Punto Final



Inicio: Verde



Final: Rojo

Registrar volumen gastado cuando cambie de verde a rojo

Figura 8. Esquema metodológico para la determinación del carbono orgánico del suelo mediante el método de Walkley y Black (1934).

Fuente: Elaboración propia

Calculo carbono orgánico

Para calcular el porcentaje de carbono orgánico se utilizó la siguiente formula:

$$CO\% = \frac{(V_{blanco} - V_{muestra}) \times M_{Fe^{2+}} \times 0.003 \times 100 \times f}{w}$$

Donde:

CO% es el porcentaje de carbono orgánico.

V_{blanco} es el volumen de titulante utilizado en el blanco en ml.

$V_{muestra}$ es el volumen de titulante utilizado en la muestra en ml.

$M_{Fe^{2+}}$ concentración de solución de $FeSO_4$.

0.003 es el carbono oxidado.

f es el factor de corrección, 1.3.

w es el peso de la muestra en gramos.

Calculo materia orgánica

El contenido de materia orgánica se determinó a partir del carbono orgánico mediante el factor de Van Bemmelen.

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ carbono orgánico} \times 1.724$$

Dónde 1.724 corresponde a la relación 100/58, asumiendo que la materia orgánica contiene en promedio un 58% de carbono orgánico.

4.7.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se determinó en laboratorio siguiendo el procedimiento descrito por la FAO (2021b), el cual se presenta en la siguiente Figura 9. El análisis permitió conocer la concentración de sales disueltas en el suelo (Corwin y Yemoto 2020). Este parámetro es uno de los más utilizados para evaluar la salinidad en suelos y aguas (Campos-Granados y Méndez 2025).

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE)

Método de extracción suelo/agua (1:5) relación masa/volumen.

Preparación de la muestra

Calibración y medición

1 Pesaje de Muestras



Pesar 10 g de suelo tamizado (2mm)

2 Dilución en agua



Agregar 50 ml de agua destilada para mantener una relación suelo:agua de 1:5

3 Agitación Mecánica



Agitar las muestras en agitador orbital durante 60 min a 200 rpm

4 Periodo de Reposo



Dejar reposar las muestras durante 30 min

5 Calibración del Equipo



Calibrar el conductímetro siguiendo las indicaciones del fabricante

6 Toma de lectura



Introducir el electrodo en la solución de la muestra sin tocar el sedimento del fondo

7 Registro de Resultados



Esperar que la lectura se estabilice y registrar el valor (dS/m ó $\mu\text{S}/\text{cm}$)

8 Limpieza del Electrodo



Lavar y secar el electrodo con agua destilada siempre antes de una nueva lectura

Figura 9. Esquema metodológico empleado para la determinación de la conductividad eléctrica del suelo mediante el procedimiento descrito por la FAO (2021b).

Fuente: Elaboración propia

4.7.4. Densidad real

La densidad real del suelo se determinó mediante el método del picnómetro, basado en el principio de Arquímedes donde el volumen de los sólidos se determina midiendo el volumen de agua desplazada por una masa conocida de suelo seco (Rojas, 2013). En el siguiente esquema (Figura 10) se describe a detalle el procedimiento utilizado:

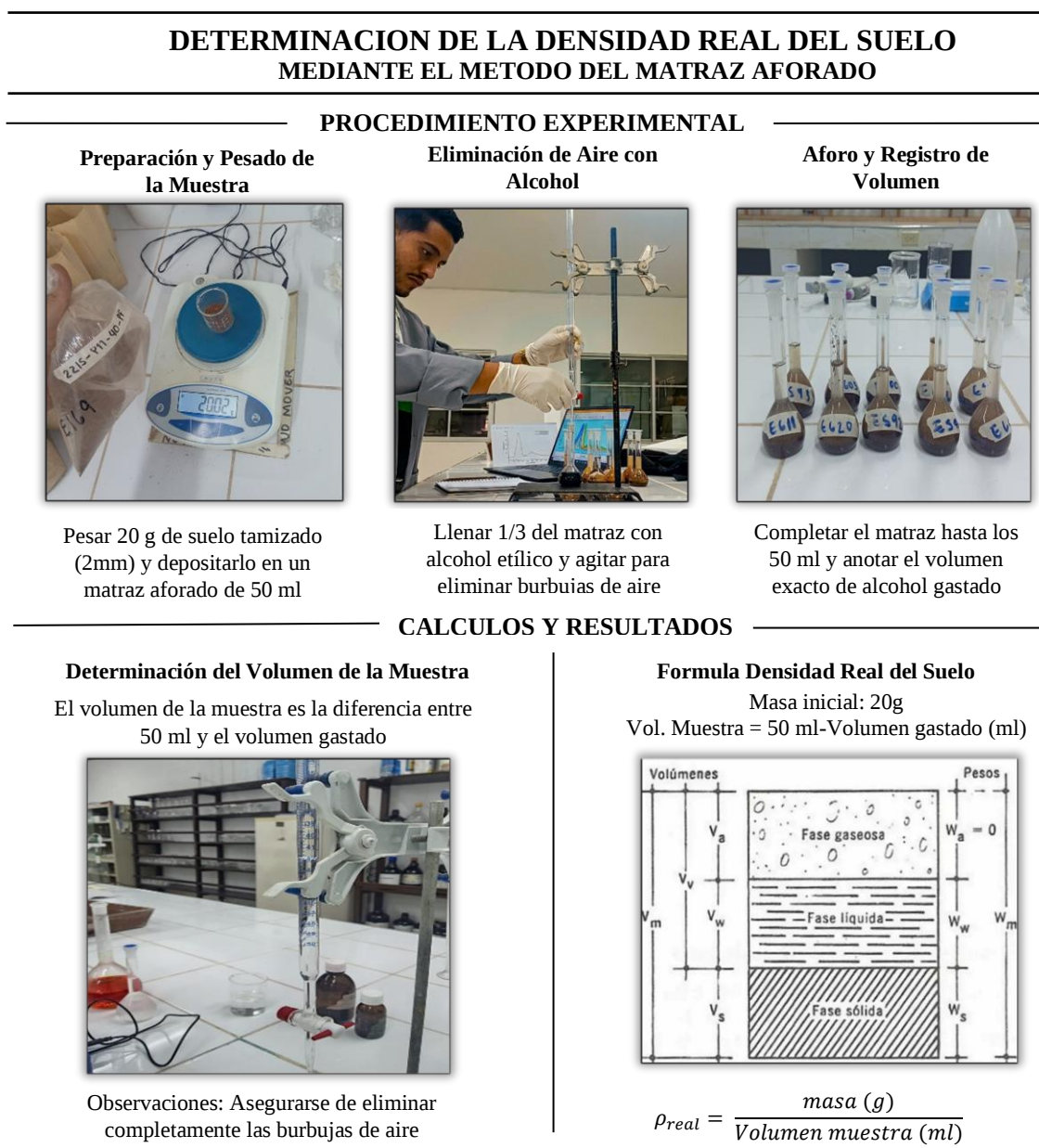


Figura 10. Esquema metodológico empleado para la determinación de la densidad real del suelo mediante el método del picnómetro.

Fuente: Elaboración propia

4.7.5. Determinación de la Densidad aparente

La densidad aparente del suelo (D_a) se determinó siguiendo la metodología propuesta por Agostini *et al.* (2014), conocida como método del cilindro que consiste en introducir un cilindro metálico de volumen conocido en el suelo para extraer la muestra indisturbada.

Sabiendo lo antes mencionado, para esta determinación se emplearon las mismas muestras utilizadas para la elaboración de las curvas de retención de humedad del suelo. Debido a que durante dicho procedimiento se obtuvo la masa seca del suelo mediante secado en estufa a 105 °C hasta peso constante, por lo que no fue necesario realizar nuevamente esta etapa. Con los datos de masa seca y el volumen conocido de cada cilindro, se calculó la densidad aparente del suelo.

Fórmula para calcular densidad aparente:

$$\rho_b = \frac{\text{peso del conjunto (muestra+cilindro)} - \text{Peso del cilindro}}{\text{Volumen del cilindro}}$$

4.7.7 Porosidad total

La porosidad total representa la fracción del volumen total del suelo ocupada por poros o espacios vacíos, por lo que para este análisis se siguió la metodología de Flores Delgadillo y Alcalá Martínez (2010), descrita en el manual de procedimientos analíticos de física de suelos. La porosidad total se estimó a partir de la siguiente expresión:

$$\phi = \text{volumen de vacíos o huecos} / \text{volumen total del suelo}$$

Considerando lo anterior, se determinó la porosidad total del suelo a partir de la relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo, mediante la siguiente formula:

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

Donde:

φ : Porosidad total del suelo (%)

ρ_b : Densidad aparente (g/cm³)

ρ_p : Densidad real o densidad de partículas (g/cm³)

La porosidad de cada muestra se obtuvo a partir de los valores de densidad aparente y densidad real previamente determinados en laboratorio.

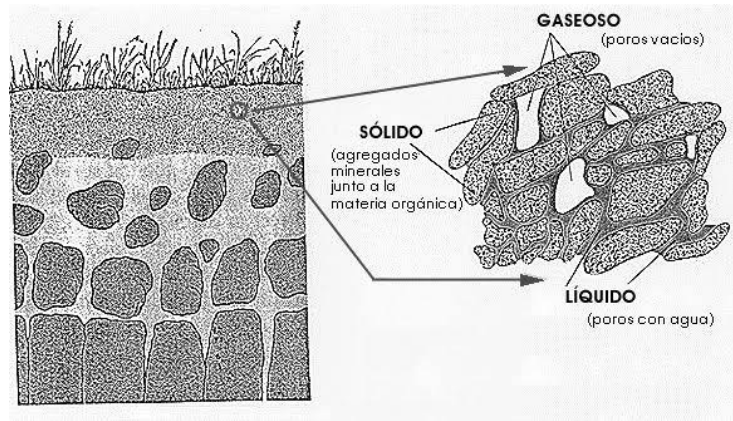


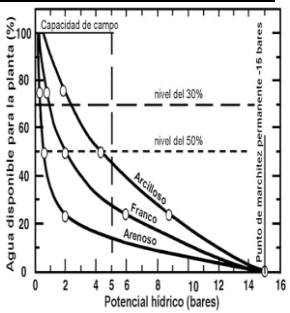
Figura 11. Relación de las fases del suelo con la porosidad

Fuente: (Vera 2012).

4.7.7. Curva de retención de humedad del suelo

La curva de retención de humedad o curva característica, se determinó en el Laboratorio de Riegos de la Universidad Nacional De Agricultura, mediante el método de la olla de presión Richards, siguiendo la metodología descrita por Enciso Vargas *et al.* (2018) (Anexo 3 y Anexo7).

Cuadro 4. Resumen del Proceso Metodológico de Olla de Presión Richards

Fase	Procedimiento Específico	Materiales / Equipo	Control y Observaciones	Anexo
Preparación de las Muestras	- Cubrir el cilindro con papel filtro y sujetarlo con ligas de hule para evitar que la tierra se escape. - Saturación por capilaridad en bandeja con una lámina de agua destilada (24-48 horas).	Cilindros con muestras indisturbadas, agua destilada, papel filtro, espátula y ligas de hule.	La duración de la saturación depende de la textura (es más larga en el caso de las arcillas).	
Montaje de las muestras en las Ollas Richards	- Colocación de las muestras en la placa de cerámica porosa (previamente saturada por 24 horas). - Montaje de las placas con las muestras en el interior de las Ollas Richards. - Conexión del desagüe y cierre hermético de la tapa.	Olla de presión Richards, balanza de precisión (0.01 g), placa porosa de cerámica.	Asegurarse que las muestras estén en contacto con la placa de cerámica. Garantizar el sellado para prevenir la fuga de presión.	
Aplicación de Presiones y Pesajes Húmedos	- Se debe aplicar las presiones deseadas por fases. - Para cada presión: esperar a que el drenaje se detenga o que llegue al equilibrio, lo que puede tardar de uno a siete días dependiendo de la textura. - Liberar presión, tomar muestra, pesar de manera rápida y volver a colocar en la olla.	Balanzas, manómetros, olla de Richards y compresor.	Para reducir la evaporación, cubrir los extremos del cilindro durante el pesaje.	
Secado Final y Pesaje Seco	- Después de la última presión, recolectar las muestras y secarlas en estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante un período de 24 a 48 horas hasta que alcancen un peso constante. - Extraer el cilindro y pesarlo para determinar su peso seco final.	Sobre de papel, espátula, balanza y estufa.	Garantizar la identificación de cada muestra. El peso seco es constante y se emplea para determinar todos los niveles de humedad previos.	
Cálculo y Obtención de la Curva	- Para cada presión es necesario calcular: Humedad Gravimétrica Humedad Volumétrica - Realizar grafico de la humedad con relación al potencial matricial. - Ajustar los puntos al modelo de ajuste de Van Genuchten.	Software de hoja de cálculo (Excel) y software de ajuste (RETC).	La curva se elabora utilizando los pares conseguidos (humedad y potencial matricial). Los parámetros hidráulicos se obtienen del ajuste al modelo.	

Fuente: Elaboración propia

a. Tratamiento de las muestras de suelo antes de ingresar a la olla de presión

A las muestras de suelo se le colocó papel filtro sujeto con ligas de hule para la pérdida de suelo al ser saturadas. Posteriormente, se colocaron en una bandeja con agua destilada para que se saturaran y se humedezcan por capilaridad, proceso que varió según la textura del suelo, alcanzando hasta 72 horas en las muestras arcillosas. Es necesario mantener un volumen de agua suficiente para que cubra un cuarto de la altura del cilindro para la saturación (Anexo 8 y Anexo 9).

b. Preparación de la Olla Richards antes de introducir las muestras de suelo

Después de haber saturado las muestras, se colocaron en conjunto con el papel filtro sobre una placa de cerámica porosa (previamente saturada por 24 horas) y se introdujeron en la olla de presión (Anexo 10). Se conectó el tubo de salida de la olla con la salida del desagüe de la placa. Se procedió a cerrar la tapa de la olla, asegurando con firmeza todos los cerrojos. Importante aclarar que, según el tipo de textura, se aplican las presiones siguiendo las instrucciones que aparecen en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6. Presiones recomendadas para la determinación de curvas de retención según textura del suelo

Textura del suelo	Presiones aplicadas (bares)	Rango de succión (kPa)	Tiempo equilibrio	Observaciones
Franco-arcillosa	0.1, 0.33, 1, 5, 15	10–1500	5-7 días	Suelos finos requieren mayor resolución en bajas tensiones.
Franco-arenosa	0.1, 0.33, 1, 5, 10	10–1000	3-5 días	Presión máxima reducida por menor retención a altas tensiones.
Arcillosa	0.33, 1, 5, 15, 30	33–3000	7-10 días	Incluye 30 bares para capturar el rango de marchitez permanente.
Arenosa	0.1, 0.33, 1, 5	10–500	2-4 días	Suelo grueso, retención baja; presiones altas no necesarias.

Fuente: Enciso Vargas *et al.* (2018); Flores & Martínez (2010); ISO 11274: 2019.

c. Funcionamiento de la olla a presión

Se determinó el contenido de humedad a diferentes tensiones con la olla a presión Richards, de acuerdo con las especificaciones del manual del fabricante, Soilmoisture Equipment Corp. (2017), complementado de los pasos metodológicos propuestos por Flores Delgadillo y Alcalá Martínez (2010) (Anexo 13).

d. Cálculo de pesos húmedos del suelo bajo distintas presiones

Una vez que se llegó al punto de equilibrio o que el drenaje haya terminado por completo (0.01 bar), la presión ejercida se liberó y se quitó la tapa de la olla Richards. Se procedió a quitarles el papel filtro a cada una de las muestras para posteriormente ser pesadas. Durante el pesaje se procuró tapar las muestras con el objetivo de evitar que se evaporen lo menos posible.

Una vez las muestras al ser pesadas se volvieron a poner sobre la placa de cerámica porosa. Como observación es importante decir que el proceso de pesar las muestras de suelo húmedo debe procurarse hacerlo lo más rápido posible para evitar pérdidas por evaporación. Al terminar el pesaje se aplicó la siguiente presión deseada equivalente a 0.02 bares, y se esperará nuevamente a que las muestras lleguen al equilibrio una vez más. Tras alcanzar el equilibrio, se repetirán todos los procesos anteriores utilizando las siguientes presiones: 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3, 5, 10 y 15 bares (Anexo 11, Anexo 12 y Anexo 14)).

e. Pesaje de suelo seco

Para esta fase se procedió a sacar las muestras de la olla a presión después de haberles aplicado todas las presiones deseadas, posteriormente se llevaron al horno para que se sequen a una temperatura constante de 105°C. En el horno se dejaron entre 24-48 horas con el objetivo de eliminar toda el agua que quede en las muestras. Después de la fase de secado, las muestras fueron retiradas del horno con ayuda de una espátula (Anexo 15). Posteriormente, se determinó el peso de cada muestra junto con respectivo cilindro. Una vez registrado el peso del conjunto (suelo seco + cilindro), se retiró cuidadosamente el suelo seco para pesar únicamente el cilindro. La diferencia entre ambas mediciones permitió obtener el peso del suelo seco.

Con toda la información obtenida, se aplicó el método gravimétrico para calcular el contenido de humedad en función de la presión aplicada.

Cálculos

$$\% \text{ Humedad Gravimétrica} = \frac{P_{sh+C} - P_{ss+C}}{P_{ss+C} - P_C} \times 100$$

Donde:

P_{sh+C} = Peso del suelo húmedo + cilindro

P_{ss+C} = Peso del suelo seco + cilindro

P_C = Peso del cilindro

Determinación del contenido de humedad volumétrico (θ)

$$\theta = w \times \frac{\rho_b}{\rho_w}$$

Donde:

θ = Contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3 o m^3/m^3)

w = Contenido de humedad gravimétrico

ρ_b = Densidad aparente (g/cm^3)

ρ_w = Densidad del agua $\approx 1 \text{ g}/\text{cm}^3$

Con los valores obtenidos, se estimará la curva característica de humedad, CC (0.33 bar), PMP (15 bar) y AD (diferencia entre CC y PMP) (Bejar Pulido *et al.* 2020).

4.8. Fase de análisis estadístico

Los datos obtenidos durante las fases de campo y laboratorio fueron procesados mediante estadística descriptiva, pruebas de normalidad, análisis de correlación, modelos de regresión lineal múltiple y modelación de las curvas características de humedad. Los análisis estadísticos se realizaron principalmente en el software R y, para el desarrollo y selección de los modelos de regresión utilizados en las funciones de pedotransferencia, se empleó el software estadístico SAS. El proceso se basó siguiendo la metodología propuesta por García Coronado (2011).

4.8.1. Ajuste de las curvas mediante el modelo de van Genuchten

El ajuste de los datos obtenidos para las curvas de retención de humedad se hizo basándonos en el trabajo realizado por Romero Campos *et al.* (2020), donde utilizó el modelo hidráulico de van Genuchten-Mualem (1980), mediante un ajuste no lineal realizado en R. El modelo permitió analizar la retención de agua en función del potencial matricial y las propiedades de conductividad hidráulica de los suelos no saturados, además de posibilitar la estimación de puntos intermedios donde no se obtuvieron en laboratorio con las Ollas Richards.

Los datos experimentales de contenido de humedad y potencial matricial fueron ajustados mediante el modelo de van Genuchten, con el propósito de representar matemáticamente el comportamiento de las curvas características de humedad (Romero Campos *et al.*, 2020).

El ajuste permitió describir la relación entre el contenido de agua del suelo y la energía con la que esta es retenida, así como obtener una representación continua de la curva a partir de los puntos determinados experimentalmente. El ajuste de las curvas y el procesamiento de los resultados se realizaron mediante la herramienta estadística R Studio.

La ecuación del modelo de van Genuchten con las limitaciones, $m = 1-1/n$, es la siguiente:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha h^n]^m}$$

Donde:

θ = contenido de humedad del suelo (cm^3/cm^3)

θ_r = contenido de humedad residual del suelo (cm^3/cm^3)

θ_s = contenido de humedad de saturación de suelo (cm^3/cm^3)

h = potencial hídrico del suelo (kPa).

α = parámetro de escala inversamente proporcional al diámetro medio del poro.

n y m = parámetros de forma de la característica del agua del suelo, siendo $m = 1-1/n$.

Para obtener los parámetros del modelo de van Genuchten (θ_s , θ_r , α , n), se utilizó el programa RECT (van Genuchten et al., 1991), siguiendo el método utilizado por Romero Campos *et al.* (2020). El coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) sirvieron para analizar la precisión del ajuste.

4.8.2. Construcción de las curvas de retención de humedad

Se construyeron curvas de retención de humedad para cada finca y profundidad a partir de los valores experimentales del contenido de humedad volumétrica obtenidos mediante la aplicación de diferentes niveles de potencial matricial en la olla de presión de Richards. Las curvas se generaron relacionando el contenido de humedad volumétrica (θ) con el potencial matricial del suelo. Los valores de potencial matricial fueron aplicados en unidades de presión (bar) y posteriormente convertidos a las unidades (hPa o pF) de preferencia. Para graficar los valores del contenido de humedad volumétrica en función del potencial matricial se hizo mediante R Studio.

4.8.3. Análisis estadístico descriptivo

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. Para cada variable se calcularon la media, mediana, desviación estándar, varianza, valores mínimo y máximo y coeficiente de variación. Estos estadísticos permitieron caracterizar la distribución de los datos y determinar la variabilidad de las propiedades evaluadas entre las fincas, lotes y profundidades estudiadas.

Las variables consideradas incluyeron densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), fracciones texturales y contenido de humedad volumétrica a las diferentes tensiones evaluadas. Asimismo, se determinaron las constantes hídricas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y agua disponible (AD).

El coeficiente de variación se utilizó como indicador de la variabilidad relativa de cada propiedad, permitiendo comparar la magnitud de la dispersión entre variables expresadas en diferentes unidades.

4.8.4. Prueba de normalidad

Previo al análisis de correlación, se evaluó la distribución de las variables mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Esta prueba permitió determinar si los datos presentaban una distribución compatible con la normalidad y establecer el coeficiente de correlación apropiado para cada relación analizada.

Cuando los datos presentaron distribución normal se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Cuando los datos no cumplieron el supuesto de normalidad se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), debido a su carácter no paramétrico.

4.8.5. Análisis de linealidad de las propiedades físicas del suelo

Para evaluar el comportamiento de las relaciones entre las propiedades físicas del suelo y determinar la existencia de tendencias lineales o posibles desviaciones de la linealidad, se realizó un análisis de regresión entre las variables densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO), conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO).

Para cada combinación de variables se ajustó inicialmente un modelo de regresión lineal simple, utilizando el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de la proporción de variabilidad explicada por la relación lineal. Posteriormente, se incorporó un término cuadrático al modelo con el fin de evaluar la posible presencia de curvatura en la relación entre las variables.

La significancia estadística del término cuadrático se utilizó como criterio para identificar desviaciones respecto a un comportamiento estrictamente lineal. Se consideró evidencia de curvatura cuando el término cuadrático presentó un valor de $p < 0.05$. En los casos en que dicho término no fue significativo ($p > 0.05$), se consideró que no existía evidencia estadística

suficiente de una relación no lineal. Los resultados de este análisis fueron utilizados como un criterio complementario para caracterizar el comportamiento de las variables y apoyar la selección posterior del método de correlación empleado para evaluar las asociaciones entre las propiedades físicas y texturales del suelo.

4.8.6. Análisis de correlación

Se realizaron análisis de correlación para determinar la asociación entre las propiedades físicas del suelo y el contenido de humedad obtenido experimentalmente a las diferentes tensiones evaluadas.

La selección del coeficiente de correlación se realizó de acuerdo con los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk: Pearson para variables con distribución normal y Spearman para variables que no presentaron normalidad. Se analizó la magnitud y dirección de las asociaciones entre las propiedades físicas y el contenido de humedad, con el propósito de identificar las variables con mayor relación con la retención de humedad del suelo.

Las variables que presentaron mayor asociación con el contenido de humedad fueron consideradas como posibles variables explicativas para el desarrollo de las funciones de pedotransferencia.

4.8.7. Análisis de regresión lineal múltiple

Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para desarrollar funciones de pedotransferencia capaces de estimar el contenido de humedad del suelo a diferentes tensiones a partir de propiedades físicas determinadas experimentalmente.

Como variables independientes se consideraron las propiedades físicas del suelo con potencial explicativo para la retención de humedad, principalmente las fracciones texturales, materia orgánica y densidad aparente. El contenido de humedad volumétrica obtenido experimentalmente a cada tensión constituyó la variable dependiente.

Los modelos de regresión múltiple permitieron establecer ecuaciones matemáticas que relacionaron el contenido de humedad con las propiedades físicas del suelo y determinar la contribución de las variables explicativas en la estimación del contenido de agua.

4.8.8. Selección de modelos para las funciones de pedotransferencia

Para seleccionar los modelos de regresión con mejor capacidad predictiva se utilizó el procedimiento GLMSELECT del software SAS. Este procedimiento permitió evaluar diferentes combinaciones de variables explicativas mediante métodos de selección de modelos (SAS Institute Inc., 2026).

Se emplearon los procedimientos de selección FORWARD y STEPWISE. En el procedimiento STEPWISE, las variables fueron incorporadas progresivamente al modelo de acuerdo con el nivel de significancia establecido. En el procedimiento BACKWARD, las variables fueron incorporadas inicialmente al modelo y posteriormente eliminadas de acuerdo con su nivel de significancia.

Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las variables con valores de p menores a 0.05 cumplieron el criterio establecido para su incorporación o permanencia en el modelo, mientras que aquellas con valores de p mayores a 0.05 fueron excluidas del modelo de acuerdo con el procedimiento de selección utilizado.

La selección del mejor modelo también consideró los criterios de predicción PRESS (Prediction Error Sum of Squares) y CV PRESS. Estos criterios permitieron comparar la capacidad predictiva de los modelos evaluados; valores menores de PRESS y CV PRESS indicaron un menor error de predicción y, por tanto, un mejor comportamiento predictivo del modelo bajo los criterios utilizados.

4.8.9. Variables complementarias para determinar FPT

Las propiedades físicas sujetas de estudio fueron las siguientes: fracciones texturales (arena, limo y arcilla), contenido de MO (%), densidad aparente (DA) (g.cm^{-3}), conductividad eléctrica (dS m^{-1}), porosidad total (%) y densidad real (g cm^{-3}) (Bejar Pulido *et al.* 2020), variables utilizadas como predictores del contenido de humedad a diferentes tensiones. Las estimaciones obtenidas mediante las FPT fueron comparadas con los valores determinados experimentalmente en laboratorio utilizando las ollas de presión Richards.

4.8.10. Funciones de pedotransferencia (FPT)

Para estimar el contenido de humedad a partir de las propiedades físicas del suelo se utilizaron varios modelos de pedotransferencia. En la Tabla 7 y Tabla 8 se pueden observar funciones empleadas con el fin de obtener CC (33 kPa) y PMP (1 500 kPa) (Bejar Pulido *et al.* 2020).

Tabla 7. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 33 kPa (CC).

Modelos	Funciones de pedotransferencia
Rawls y Brakensiek, 1985	$\theta = \beta_0 + \beta_R * R + \beta_{MO} * MO$
Delgado y Barreto, 1988	$\theta = \beta_0 - \beta_A * A - \beta_L * L + \beta_R * R + \beta_{MO} * MO$
Pecorari, 1988	$\theta = \beta_0 + \beta_R * R + \beta_L * L$
Malavé, 1991	$\theta = \beta_0 - \beta_A * A + \beta_{MO} * MO$
Peralta y Barrios, 2006	$\theta = \beta_0 + \beta_A * A + \beta_L * L + \beta_{MO} * MO - \beta_{DA} * DA$
Chicas et al., 2014	$\theta = \beta_0 - \beta_{DA} * DA - \beta_R * R$

θ = Contenido de humedad; A = Arena; L = Limo; R = Arcilla; MO = Materia orgánica; DA = Densidad aparente.

Fuente: Bejar Pulido *et al.* (2020)

Tabla 8. Ecuaciones de regresión para determinar el contenido de humedad a 1 500 kPa (PMP).

Modelos	Funciones de pedotransferencia
Rawls y Brakensiek, 1985	$\theta = \beta_0 - \beta_A * A + \beta_R * R + \beta_{MO} * MO$
Delgado y Barreto, 1988	$\theta = \beta_0 - \beta_A * A - \beta_L * L + \beta_R * R + \beta_{MO} * MO$
Pecorari, 1988	$\theta = \beta_0 + \beta_L * R + \beta_L * L$
Malavé, 1991	$\theta = \beta_0 - \beta_A * A + \beta_{MO} * MO$
Peralta y Barrios, 2006	$\theta = \beta_0 + \beta_A * A - \beta_L * L + \beta_{MO} * MO - \beta_{DA} * DA$
Chicas et al., 2014	$\theta = \beta_0 - \beta_{DA} * DA - \beta_R * R$

θ = Contenido de humedad; A = Arena; L = Limo; R = Arcilla; MO = Materia orgánica; DA= Densidad aparente.

Nota: Las FPT se aplicaron para estimar el contenido de humedad a diferentes tensiones, incluyendo las correspondientes a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Fuente: Bejar Pulido *et al.* (2020)

4.8.11. Validación de funciones de pedotransferencia

El desempeño de las funciones de pedotransferencia se evaluó mediante la comparación entre los contenidos de humedad observados experimentalmente y los valores estimados por las ecuaciones. Para la evaluación de los modelos se utilizaron los siguientes indicadores (Pulido *et al.* 2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n}$$

$$R^2$$

y el sesgo medio.

Donde:

RMSE= Raíz del error cuadrático medio

MAE: Error absoluto

R^2 : Coeficiente de determinación

O_i = Contenido de humedad observado

P_i = Contenido de humedad predicho

n = Numero de observaciones

El MAE facilitó el cálculo del error absoluto promedio, mientras que el RMSE hizo posible medir la magnitud de la discrepancia entre los valores calculados y observados. La tendencia de los modelos a sobrestimar o subestimar los valores observados fue detectada gracias al sesgo medio. Se eligió el modelo con el mejor rendimiento, teniendo en cuenta un R^2 superior y valores de RMSE, MAE y sesgos inferiores. (Pulido *et al.* 2020).

Para validar las funciones se dividieron los datos en dos conjuntos: uno para calibración y otro para validación. El análisis realizado utilizó un 70 % de datos para la calibración y un 30 % para la validación, los cuales se eligieron de manera aleatoria del conjunto de datos, conforme al procedimiento descrito previamente.

4.8.12 Comparación entre valores observados y estimados

Se compararon los resultados de contenido de humedad obtenidos en laboratorio a través de las ollas de presión Richards con los valores estimados usando las funciones de pedotransferencia propias y las de otros autores.

Esta comparación posibilitó identificar la habilidad de las FPT para predecir la retención de humedad del suelo a diferentes tensiones y definir cuáles modelos mostraron mayor exactitud en las condiciones de suelo en las fincas evaluadas.

4.8.13. Análisis espacial y geoestadístico

Para caracterizar la variabilidad de las propiedades físicas del suelo en términos espaciales, se utilizó métodos geoestadístico (cálculo de semivariograma e interpolación a través de kriging), (Romano y Palladino 2002). De igual manera se realizó un agrupamiento por niveles jerárquicos de las curvas de retención de humedad, esto con el fin de determinar patrones espaciales predominantes.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Fase preliminar

La fase preliminar permitió establecer la distribución espacial de los puntos de muestreo y organizar la información necesaria para relacionar posteriormente las propiedades físicas e hidráulicas con la ubicación de cada muestra dentro de las fincas evaluadas.

5.1.1. Distribución espacial de los puntos de muestreo

La planificación del muestreo se realizó mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando la distribución de las fincas y lotes, la información disponible sobre las condiciones del suelo y la ubicación de los tensiómetros instalados. Se definieron 30 puntos de muestreo distribuidos en las áreas seleccionadas, procurando obtener una representación de las condiciones edáficas presentes en las fincas evaluadas.

La distribución de los puntos posibilitó abarcar diferentes fincas y lotes, como Santa Paula, Los Llanos, Palo Verde, Tronadora 1, Tronadora 2 S1, entre otras. De igual forma, durante la planificación se registraron diversas clases texturales en los lotes, incluyendo franco, franco arenoso, franco arcilloso y franco arcilloso arenoso. Sin embargo, durante el análisis de textura realizado en laboratorio se observaron algunas diferencias respecto a las texturas previamente reportadas, lo cual podría estar asociado a un tipo de muestreo diferente o prácticas mecánicas realizadas dentro de los lotes evaluados.

La ubicación georreferenciada de los puntos constituye una base importante para comparar posteriormente las propiedades físicas y el comportamiento de las curvas características de humedad entre sitios y profundidades. Esta planificación es relevante debido a que la variabilidad espacial del suelo puede generar diferencias en la retención de agua y debe

considerarse al momento de caracterizar sus propiedades hidráulicas (Cichota y de Jong van Lier, 2004).

5.2. Fase de campo

La fase de campo permitió obtener las muestras representativas de las condiciones edáficas de las fincas evaluadas y conservar la identificación espacial de cada sitio para su posterior procesamiento en laboratorio y análisis estadístico.

5.2.1 Muestreo y distribución de muestras

En la Tabla 9 se presenta la distribución de los puntos y muestras obtenidas durante la fase de campo, considerando las fincas y las dos profundidades de evaluación.

Tabla 9. Distribución de las muestras por finca y profundidad

Finca	Área (ha)	Puntos de muestreo	Representatividad	Profundidad		Total
				0–20 cm	20–40 cm	
Palo Verde	24.10	2	12.05 ha punto ⁻¹	4	4	8
Los Llanos	13.57	2	6.79 ha punto ⁻¹	4	4	8
Santa Paula	30.55	4	7.63 ha punto ⁻¹	8	8	16
Tronadora 1	29.83	4	7.46 ha punto ⁻¹	8	8	16
Tronadora 2 S1	14.52	2	7.26 ha punto ⁻¹	4	4	8
Total	112.57	12	41.19 ha punto⁻¹	28	28	56

Nota: Se realizó un punto de muestreo por lote. Los valores de puntos de muestreo se refieren a la cantidad de lotes que fueron muestreados dentro de esa misma finca. Área es la suma de los lotes en ha dentro de la finca.

Fuente: Elaboración propia

La distribución final comprendió 12 puntos de muestreo y 56 muestras, considerando las dos profundidades establecidas y las repeticiones correspondientes. Santa Paula y Tronadora 1 concentraron el mayor número de muestras, con 16 cada una, mientras que Palo Verde, Los Llanos y Tronadora 2 S1 aportaron ocho muestras por finca.

La mayor intensidad de muestreo en Santa Paula y Tronadora 1 permitió representar una mayor cantidad de puntos dentro de estas fincas y, posteriormente, evaluar con mayor detalle la variabilidad existente entre sus lotes. Esta decisión es relevante debido a que la variabilidad espacial de las propiedades físicas puede generar diferencias en el comportamiento de la retención de humedad. Grego y Vieira (2005) encontraron que propiedades como densidad aparente, porosidad y retención de humedad pueden presentar diferencias espaciales dentro de una misma parcela.

La selección de las profundidades de 0–20 y 20–40 cm permitió comparar el comportamiento de las propiedades físicas e hidráulicas en ambas profundidades. Esta comparación resulta particularmente importante para la interpretación del almacenamiento de agua, debido a que los cambios en densidad, textura y el contenido de materia orgánica en función de la profundidad pueden modificar la distribución de los poros del suelo y, consecuentemente, la retención y disponibilidad de agua.

5.3. Fase de laboratorio

La fase de laboratorio permitió caracterizar las propiedades físicas del suelo y su retención de humedad a diferentes potenciales matriciales, clave para analizar su comportamiento hidráulico del suelo, ejecutar análisis estadísticos y estructurar modelos de predicción. Esta caracterización integral es fundamental, ya que la disponibilidad de humedad no depende de un factor aislado, sino de la interacción de varios; como ser la textura, densidad, porosidad y materia orgánica (García Coronado, 2011).

5.3.1. Caracterización de las propiedades físicas del suelo

Los resultados de las propiedades físicas del suelo se presentan en la Tabla 10, donde se muestran los estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO) y materia orgánica (MO). Estas variables permiten caracterizar las condiciones físicas de los suelos evaluados y establecer posteriormente su relación con el comportamiento hídrico.

Tabla 10. Estadísticos descriptivos generales de las propiedades físicas del suelo (n=60).

Variable	Media	Mediana	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo
CE (dS m ⁻¹)	0.10	0.08	0.05	49.92	0.05	0.25
DA (g cm ⁻³)	1.53	1.59	0.26	17.00	0.82	2.01
DR (g cm ⁻³)	2.43	2.44	0.14	5.63	2.25	2.90
MO (%)	1.80	1.69	0.97	53.73	0.14	5.12
PO (%)	37.40	35.89	8.79	23.50	21.48	63.88

DE: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; CE = Conductividad eléctrica; DA = Densidad aparente; DR = Densidad real; MO = Materia orgánica; PO = Porosidad total.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostraron una DA media de 1.53 g cm⁻³, con valores entre 0.82 y 2.01 g cm⁻³, mientras que la PO presentó una media de 37.40 %. El valor máximo de DA (2.01 g cm⁻³) fue superior al máximo de 1.80 g cm⁻³ reportado por García Coronado (2011) para suelos sometidos a labranza intensiva, mientras que la relación observada entre DA y PO coincide con lo señalado por este autor, quien indica que un incremento de la densidad aparente se relaciona con una disminución de la porosidad.

El contenido de MO presentó una media de 1.80 %, con un intervalo de 0.14 a 5.12 %. Esta media se encuentra próximo al 2.1 % reportado por Ruiz et al. (2009) en un suelo cultivado con caña de azúcar, aunque en el presente estudio se observó una mayor amplitud de valores entre las muestras.

5.3.2. Diferencias de las propiedades físicas entre fincas

Los resultados de las propiedades físicas por finca se presentan en la Tabla 11, donde se muestran los valores medios y la desviación estándar de la conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO) y materia orgánica (MO). Esta comparación permitió identificar diferencias entre las fincas evaluadas y establecer cuáles presentaron mayor variabilidad en sus propiedades físicas.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas por finca (medias $\pm$ DE).

Finca	n	CE (dS m ⁻¹)	DA (g cm ⁻³)	DR (g cm ⁻³)	PO (%)	MO (%)
El Pedregal	4	0.14 $\pm$ 0.07 (0.08–0.19)	1.56 $\pm$ 0.52 (0.82–1.94)	2.39 $\pm$ 0.13 (2.27–2.50)	35.16 $\pm$ 19.41 (22.40–63.88)	3.60 $\pm$ 1.76 (2.07–5.12)
Los Llanos	8	0.06 $\pm$ 0.01 (0.05–0.08)	1.64 $\pm$ 0.08 (1.53–1.80)	2.52 $\pm$ 0.03 (2.50–2.56)	34.99 $\pm$ 2.83 (29.69–38.80)	2.06 $\pm$ 0.16 (1.83–2.24)
Palo Verde	8	0.15 $\pm$ 0.07 (0.08–0.25)	1.59 $\pm$ 0.03 (1.55–1.65)	2.41 $\pm$ 0.08 (2.30–2.50)	33.97 $\pm$ 3.01 (29.57–38.00)	1.54 $\pm$ 0.50 (0.86–2.17)
Santa Paula	16	0.11 $\pm$ 0.06 (0.06–0.24)	1.66 $\pm$ 0.22 (1.29–2.01)	2.48 $\pm$ 0.09 (2.35–2.56)	33.26 $\pm$ 7.45 (21.48–45.85)	1.59 $\pm$ 0.90 (0.14–2.86)
Tronadora 1	16	0.08 $\pm$ 0.01 (0.06–0.10)	1.24 $\pm$ 0.17 (1.05–1.63)	2.32 $\pm$ 0.08 (2.25–2.47)	46.70 $\pm$ 5.58 (34.01–53.74)	1.68 $\pm$ 0.90 (0.38–3.07)
Tronadora 2 S1	8	0.10 $\pm$ 0.03 (0.08–0.14)	1.67 $\pm$ 0.09 (1.53–1.80)	2.53 $\pm$ 0.23 (2.38–2.90)	34.03 $\pm$ 3.74 (28.99–38.62)	1.55 $\pm$ 0.75 (0.52–2.31)

Nota: Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar, con el intervalo mínimo–máximo entre paréntesis. CE = conductividad eléctrica; DA = densidad aparente; DR = densidad real; PO = porosidad; MO = materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia

La densidad aparente presentó diferencias entre las fincas, con el menor valor medio en Tronadora 1 (1.24 g cm⁻³) y valores superiores en Santa Paula (1.66 g cm⁻³), Los Llanos (1.64 g cm⁻³) y Tronadora 2 S1 (1.67 g cm⁻³). Esta variación coincide con lo reportado por Usaborisut y Sukcharoenvipharat (2011) en suelos cultivados con caña de azúcar, donde la densidad aparente varió entre 1.24 y 1.78 g cm⁻³. Asimismo, la relación entre DA y PO observada en este estudio coincide con García Coronado (2011), ya que Tronadora 1 presentó la menor DA y la mayor PO (46.70 %), mientras que las fincas con mayores valores de DA presentaron valores de PO cercanos al 34 %.

En cuanto a la MO, los valores medios variaron entre 1.54 % en Palo Verde y 2.06 % en Los Llanos. El valor de Los Llanos fue similar al 2.1 % reportado por Ruiz *et al.* (2009) en un suelo cultivado con caña de azúcar, por lo que ambos resultados muestran una magnitud comparable. En cambio, Palo Verde presentó un contenido menor, lo que evidencia diferencias entre fincas que pueden estar asociadas a las condiciones particulares de manejo y aporte de residuos.

5.3.3. Diferencias de las propiedades físicas entre lotes

Los resultados de las propiedades físicas por finca y lote se presentan en la Tabla 12, donde se muestran los valores medios y la desviación estándar de la conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO) y materia orgánica (MO). El análisis por lote permitió identificar diferencias dentro de una misma finca que no se observan al considerar únicamente los valores medios generales.

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas por finca y lote (medias $\pm$ DE).

Finca	Lote	n	CE (dS m ⁻¹)	DA (g cm ⁻³)	DR (g cm ⁻³)	PO (%)	MO (%)
El Pedregal	15	4	0.14 $\pm$ 0.07 (0.08–0.19)	1.56 $\pm$ 0.52 (0.82–1.94)	2.39 $\pm$ 0.13 (2.27–2.50)	35.16 $\pm$ 19.41 (22.40–63.88)	3.60 $\pm$ 1.76 (2.07–5.12)
Los Llanos	20	4	0.06 $\pm$ 0.02 (0.05–0.08)	1.69 $\pm$ 0.08 (1.62–1.80)	2.53 $\pm$ 0.03 (2.50–2.56)	33.30 $\pm$ 2.88 (29.69–36.72)	2.04 $\pm$ 0.24 (1.83–2.24)
Los Llanos	40	4	0.07 $\pm$ 0.00 (0.06–0.07)	1.59 $\pm$ 0.05 (1.53–1.65)	2.52 $\pm$ 0.02 (2.50–2.53)	36.69 $\pm$ 1.65 (34.78–38.80)	2.09 $\pm$ 0.02 (2.07–2.10)
Palo Verde	09	4	0.09 $\pm$ 0.01 (0.08–0.11)	1.59 $\pm$ 0.04 (1.56–1.65)	2.41 $\pm$ 0.03 (2.38–2.44)	33.90 $\pm$ 2.50 (30.67–36.07)	1.56 $\pm$ 0.10 (1.47–1.65)
Palo Verde	21	4	0.20 $\pm$ 0.06 (0.15–0.25)	1.58 $\pm$ 0.03 (1.55–1.62)	2.40 $\pm$ 0.12 (2.30–2.50)	34.03 $\pm$ 3.86 (29.57–38.00)	1.52 $\pm$ 0.76 (0.86–2.17)
Santa Paula	09	4	0.07 $\pm$ 0.01 (0.06–0.08)	1.56 $\pm$ 0.19 (1.29–1.71)	2.40 $\pm$ 0.05 (2.35–2.44)	35.05 $\pm$ 6.92 (29.92–45.11)	2.05 $\pm$ 0.66 (1.48–2.62)
Santa Paula	23	4	0.16 $\pm$ 0.09 (0.09–0.24)	1.87 $\pm$ 0.10 (1.79–2.01)	2.53 $\pm$ 0.03 (2.50–2.56)	26.21 $\pm$ 3.18 (21.48–28.40)	0.33 $\pm$ 0.22 (0.14–0.52)
Santa Paula	30	4	0.09 $\pm$ 0.02 (0.07–0.11)	1.82 $\pm$ 0.04 (1.77–1.86)	2.56 $\pm$ 0.00 (2.56–2.56)	29.10 $\pm$ 1.44 (27.34–30.86)	1.73 $\pm$ 0.20 (1.55–1.90)
Santa Paula	37	4	0.11 $\pm$ 0.03 (0.09–0.14)	1.40 $\pm$ 0.05 (1.35–1.47)	2.44 $\pm$ 0.10 (2.35–2.53)	42.68 $\pm$ 2.29 (40.43–45.85)	2.24 $\pm$ 0.72 (1.62–2.86)
Tronadora 1	08	4	0.07 $\pm$ 0.00 (0.07–0.07)	1.15 $\pm$ 0.07 (1.05–1.21)	2.26 $\pm$ 0.01 (2.25–2.27)	49.33 $\pm$ 3.17 (46.22–53.74)	0.80 $\pm$ 0.48 (0.38–1.21)
Tronadora 1	10	4	0.07 $\pm$ 0.00 (0.06–0.07)	1.14 $\pm$ 0.06 (1.09–1.23)	2.25 $\pm$ 0.00 (2.25–2.25)	49.56 $\pm$ 2.85 (45.33–51.56)	3.04 $\pm$ 0.04 (3.00–3.07)
Tronadora 1	13	4	0.09 $\pm$ 0.01 (0.08–0.10)	1.46 $\pm$ 0.18 (1.29–1.63)	2.43 $\pm$ 0.05 (2.38–2.47)	40.00 $\pm$ 6.24 (34.01–45.80)	1.55 $\pm$ 0.08 (1.48–1.62)
Tronadora 1	20	4	0.07 $\pm$ 0.01 (0.07–0.08)	1.21 $\pm$ 0.08 (1.13–1.30)	2.33 $\pm$ 0.06 (2.27–2.38)	47.91 $\pm$ 4.05 (42.73–52.52)	1.35 $\pm$ 0.43 (0.97–1.72)
Tronadora 2 S1	09	4	0.12 $\pm$ 0.03 (0.09–0.14)	1.63 $\pm$ 0.07 (1.53–1.69)	2.38 $\pm$ 0.00 (2.38–2.38)	31.41 $\pm$ 3.08 (28.99–35.71)	1.42 $\pm$ 1.03 (0.52–2.31)
Tronadora 2 S1	17	4	0.09 $\pm$ 0.01 (0.08–0.09)	1.70 $\pm$ 0.11 (1.57–1.80)	2.69 $\pm$ 0.25 (2.47–2.90)	36.65 $\pm$ 2.23 (33.60–38.62)	1.68 $\pm$ 0.46 (1.28–2.07)

Nota: Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar, con el intervalo mínimo–máximo entre paréntesis. CE = conductividad eléctrica; DA = densidad aparente; DR = densidad real; PO = porosidad; MO = materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidenciaron diferencias entre los lotes. En Tronadora 1, los lotes 08 y 10 presentaron valores de densidad aparente de 1.15 y 1.14 g cm⁻³, densidades reales de 2.26 y 2.25 g cm⁻³ y porosidades totales de 49.3 y 49.6 %, respectivamente. Por su parte, el lote 23 de Santa Paula registró una densidad aparente de 1.87 g cm⁻³, densidad real de 2.53 g cm⁻³, porosidad total de 26.2 % y materia orgánica de 0.33 %.

Estas diferencias evidencian que las propiedades físicas variaron incluso dentro de una misma finca. Los lotes 08 y 10 de Tronadora 1 presentaron menores valores de densidad aparente y mayores valores de porosidad total, mientras que el lote 23 de Santa Paula mostró una mayor densidad aparente, menor porosidad total y el menor contenido de materia orgánica. Esta combinación puede influir en la distribución del agua en el suelo y, por tanto, en su comportamiento frente a diferentes valores de potencial matricial.

La relación observada entre densidad aparente, porosidad total y materia orgánica coincide con lo señalado por Kay y Angers (1999), quienes destacan la importancia de la materia orgánica en las propiedades físicas del suelo. En el lote 23 de Santa Paula, el bajo contenido de materia orgánica (0.33 %) podría estar asociado con los mayores valores de densidad aparente y la menor porosidad total registrados en este sitio. Estas diferencias deben considerarse al interpretar las curvas de retención de humedad, debido a su relación con la cantidad de agua retenida a distintos potenciales matriciales.

5.3.4. Caracterización textural

La Tabla 13 presenta los contenidos de arena, limo y arcilla, así como la clasificación textural de los suelos evaluados según el triángulo USDA. Estos resultados permiten identificar las diferencias en la composición granulométrica entre fincas, lotes y profundidades, información necesaria para interpretar posteriormente el comportamiento hidráulico del suelo.

Tabla 13. Distribución de arena, limo y arcilla por finca, lote y profundidad

Finca	Lote	Prof. (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Los Llanos	20	0–20	77.2	9.2	13.6	Franco Arenosa
		20–40	80.0	6.4	13.6	Franco Arenosa
	40	0–20	79.4	6.6	14.0	Franco Arenosa
		20–40	75.2	10.8	14.0	Franco Arenosa
Palo Verde	09	0–20	58.0	16.0	26.0	Franco Arcillo Arenosa
		20–40	60.0	14.4	25.6	Franco Arcillo Arenosa
	21	0–20	69.2	11.2	19.6	Franco Arenosa
		20–40	73.2	12.8	14.0	Franco Arenosa
Santa Paula	09	0–20	77.0	11.4	11.6	Franco Arenosa
		20–40	75.2	12.2	12.6	Franco Arenosa
	23	0–20	78.0	6.4	15.6	Franco Arenosa
		20–40	77.2	10.2	12.6	Franco Arenosa
	30	0–20	82.2	7.8	10.0	Arena Francosa
		20–40	81.2	4.8	14.0	Franco Arenosa
	37	0–20	55.2	21.2	23.6	Franco Arcillo Arenosa
		20–40	54.0	20.4	25.6	Franco Arcillo Arenosa
Tronadora 1	08	0–20	73.2	12.2	14.6	Franco Arenosa
		20–40	67.4	18.8	13.8	Franco Arenosa
	10	0–20	69.2	16.2	14.6	Franco Arenosa
		20–40	62.0	20.4	17.6	Franco Arenosa
	13	0–20	74.0	12.4	13.6	Franco Arenosa
		20–40	74.0	8.4	17.6	Franco Arenosa
	20	0–20	78.4	8.8	12.8	Franco Arenosa
		20–40	82.0	6.0	12.0	Arena Francosa
Tronadora 2 S1	09	0–20	74.4	11.8	13.8	Franco Arenosa
		20–40	72.4	13.8	13.8	Franco Arenosa
Tronadora 2 S1	17	0–20	75.2	10.4	14.4	Franco Arenosa
		20–40	77.2	10.8	12.0	Franco Arenosa

Nota: Los valores corresponden a los porcentajes de arena, limo y arcilla determinados mediante el método de Bouyoucos. La clase textural fue establecida mediante el triángulo textural USDA.

Fuente: Elaboración propia

Los suelos evaluados presentaron predominio de la fracción arena y, en su mayoría, fueron clasificados como Franco Arenosos (78.6 %), seguidos de Franco Arcillo Arenosos (14.3 %) y Arena Francosa (7.1 %). Las principales diferencias se observaron en Palo Verde lote 09 y Santa Paula lote 37, donde los mayores contenidos de arcilla (25.6–26.0 %) correspondieron a la clase Franco Arcillo Arenosa. En cambio, Santa Paula lote 30 (0–20 cm) y Tronadora 1 lote 20 (20–40 cm) registraron los mayores contenidos de arena, con 82.2 y 82.0 %, respectivamente, clasificándose como Arena Francosa.

Entre profundidades, la distribución de arena, limo y arcilla presentó variaciones reducidas en la mayoría de los lotes. La mayor diferencia se observó en Santa Paula lote 37, donde el contenido de arcilla aumentó de 23.6 a 25.6 %, mientras que la arena disminuyó de 55.2 a 54.0 % entre 0–20 y 20–40 cm.

El predominio de la textura Franco Arenosa refleja la elevada proporción de arena observada en la mayoría de los lotes, mientras que Palo Verde lote 09 y Santa Paula lote 37 presentaron mayores contenidos de arcilla. Estas diferencias en la distribución de arena, limo y arcilla pueden contribuir a explicar variaciones en la retención y el movimiento del agua en el suelo. Rawls *et al.* (1982) utilizaron la textura, junto con otras propiedades físicas, para estimar características hidráulicas del suelo, lo que respalda la importancia de las diferencias texturales observadas en los suelos evaluados.

5.3.5. Determinación del contenido de humedad mediante la olla de presión Richards

La determinación del contenido de humedad del suelo se realizó mediante el método de la olla de presión Richards, a partir de muestras de suelo sometidas a diferentes niveles de potencial matricial (Tabla 14). La base de datos utilizada para este análisis estuvo conformada por 336 observaciones, evaluadas en las profundidades de 0–20 y 20–40 cm. Para cada finca y profundidad se registraron contenidos de humedad correspondientes a 14 niveles de tensión, desde 10 hasta 15 000 hPa.

Tabla 14. Contenido de humedad promedio del suelo en función de la tensión matricial para ambas profundidades

Tensión (hPa)	Profundidad	
	0–20 cm (%)	20–40 cm (%)
10	32.67	33.44
20	32.26	33.05
40	31.53	32.48
60	31.13	32.15
80	30.84	31.88
100	30.47	31.56
300	27.32	29.41
500	25.99	28.18
800	24.91	27.10
1000	23.97	26.39
3000	21.29	23.79
5000	19.59	22.19
10000	18.46	21.12
15000	17.73	20.39

Nota: Promedios del contenido de humedad (%) para las fincas evaluadas.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostraron una disminución progresiva del contenido de humedad conforme aumentó la tensión. En 0–20 cm, el promedio disminuyó de 32.67 % a 10 hPa hasta 17.73 % a 15 000 hPa, mientras que en 20–40 cm disminuyó de 33.44 a 20.39 %. Este comportamiento coincide con lo reportado por Romero Campos *et al.* (2020) en suelos agrícolas de Cuba, quienes también observaron una reducción del contenido de agua al incrementar la tensión aplicada, confirmando el patrón esperado de desecación del suelo. Este comportamiento constituye la base de las curvas de retención y permite identificar diferencias en la capacidad de los suelos para retener agua a distintos valores de potencial matricial (Timlin *et al.*, 2004).

5.3.6. Constantes hídricas

Las constantes hídricas mostraron diferencias entre las fincas y profundidades evaluadas, tanto en la cantidad de agua retenida a capacidad de campo como a punto de marchitez permanente y el intervalo de agua disponible (Figura 12). En términos generales, estas diferencias reflejan el comportamiento hidráulico particular de cada suelo y están asociadas con las características físicas y texturales previamente descritas.

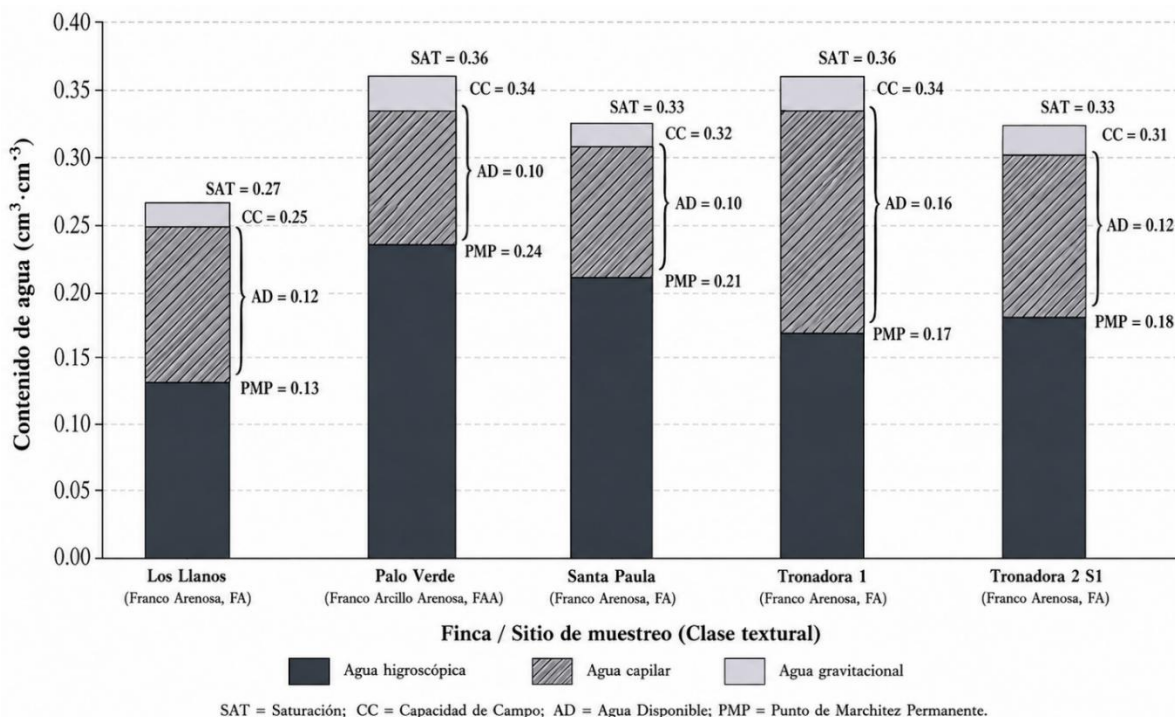


Figura 12. Constantes hídricas medias ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para las fincas evaluadas (medias $\pm$ DE).

Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad mostró diferencias entre fincas, con SAT de 0.27 a 0.36 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y CC de 0.25 a 0.34 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Palo Verde, de textura Franco Arcillo Arenosa, presentó los mayores valores de SAT y CC (0.36 y 0.34 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), mientras que Los Llanos, de textura Franco Arenosa, presentó los menores (0.27 y 0.25 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Esta mayor retención en Palo Verde se relaciona con su mayor proporción de partículas finas, ya que la textura, junto con la densidad aparente, influye en la retención de agua del suelo (Rawls et al., 1982).

Sin embargo, una mayor retención de agua no implicó una mayor disponibilidad. Tronadora 1, de textura Franco Arenosa, presentó la mayor AD ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) debido a su menor PMP ($0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), mientras que Palo Verde, de textura Franco Arcillo Arenosa, registró una AD de $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pese a presentar una CC mayor, debido a su elevado PMP ($0.24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Esto demuestra que una mayor CC no necesariamente representa una mayor AD, ya que esta última depende de la diferencia entre la CC y el PMP (Cassel y Nielsen, 1986; Brady y Weil, 2002).

Los Llanos y Tronadora 2 S1, ambos de textura Franco Arenosa, presentaron una AD intermedia de $0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, asociada con valores de PMP de 0.13 y $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, mientras que Santa Paula alcanzó $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Los resultados demostraron que Tronadora 1 presentó la condición más favorable de agua disponible, mientras que Palo Verde y Santa Paula mostraron menor disponibilidad, evidenciando que la cantidad de agua retenida por el suelo no determina por sí sola el agua potencialmente aprovechable por el cultivo (OSCIA, 2025).

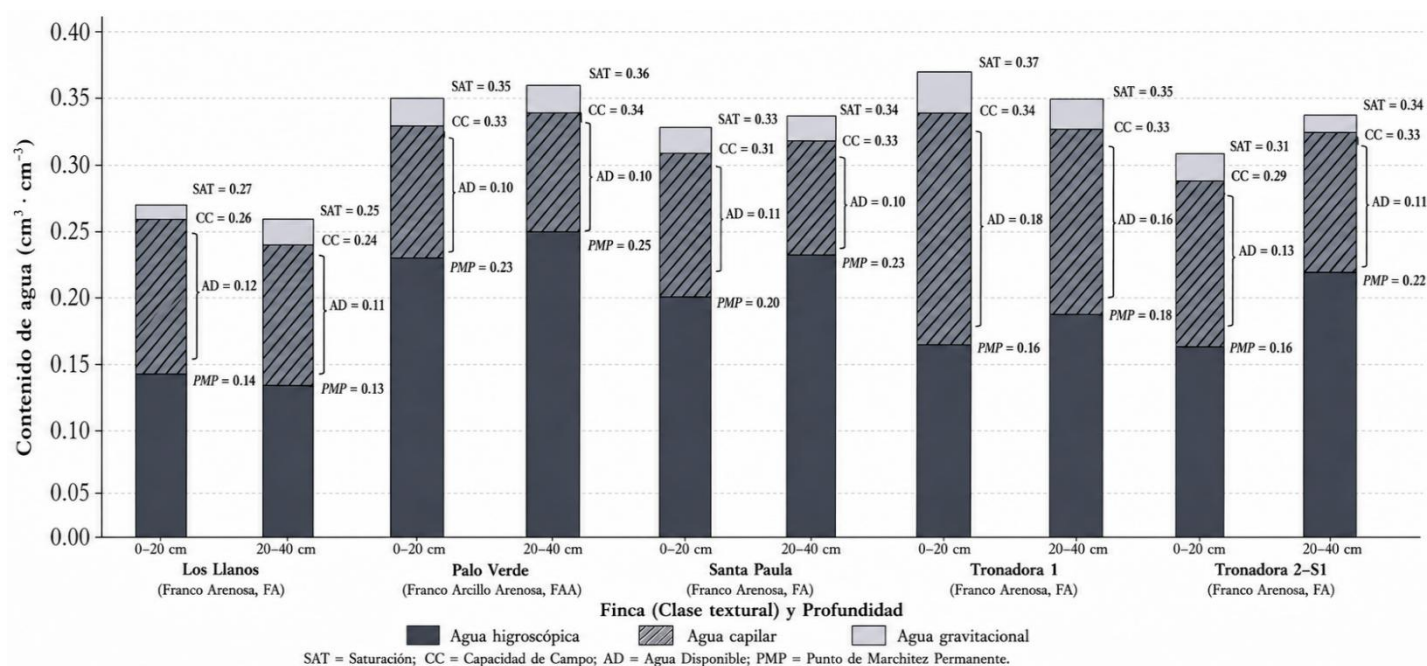


Figura 13. Constantes hídricas medias ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para cada finca y profundidad evaluada.

Fuente: Elaboración propia

La figura 13 muestra la distribución de las constantes hídricas donde variaron entre las profundidades de 0–20 y 20–40. La CC disminuyó de 0.26 a 0.24 cm³ cm⁻³ en Los Llanos y de 0.34 a 0.33 cm³ cm⁻³ en Tronadora 1; en cambio, aumentó de 0.33 a 0.34 cm³ cm⁻³ en Palo Verde, de 0.31 a 0.33 cm³ cm⁻³ en Santa Paula y de 0.29 a 0.33 cm³ cm⁻³ en Tronadora 2 S1. Estos cambios entre profundidades pueden asociarse con variaciones en textura, densidad aparente y materia orgánica, que modifican la porosidad y la capacidad del suelo para retener humedad. Este comportamiento coincide con Ballesteros *et al.* (2022), quienes relacionaron las diferencias en CC, PMP y agua disponible con las propiedades físicas del suelo.

La Tabla 15 presenta el potencial matricial correspondiente a capacidad de campo (CC) para cada finca, lote y profundidad evaluada. Los valores se expresan en pF, bar y kPa.

Tabla 15. Capacidad de campo según el potencial matricial por finca, lote y profundidad

Finca	Lote	Profundidad (cm)	CC (pF)	CC (bar)	CC (kPa)
Los Llanos	20	0–20	1.72	0.05	5
Los Llanos	20	20–40	1.73	0.05	5
Los Llanos	40	0–20	1.84	0.07	7
Los Llanos	40	20–40	1.86	0.07	7
Palo Verde	09	0–20	2.51	0.32	32
Palo Verde	09	20–40	2.45	0.28	28
Palo Verde	21	0–20	2.43	0.26	26
Palo Verde	21	20–40	2.56	0.36	36
Santa Paula	09	0–20	2.56	0.36	36
Santa Paula	09	20–40	2.31	0.20	20
Santa Paula	23	0–20	2.33	0.21	21
Santa Paula	23	20–40	2.21	0.16	16
Santa Paula	37	0–20	1.70	0.05	5
Santa Paula	37	20–40	2.40	0.25	25
Tronadora 1	08	0–20	0.69	0.005	0.5
Tronadora 1	08	20–40	1.43	0.026	2.6
Tronadora 1	10	0–20	1.51	0.032	3.2
Tronadora 1	10	20–40	1.70	0.05	5
Tronadora 1	13	0–20	2.26	0.18	18
Tronadora 1	13	20–40	2.24	0.17	17
Tronadora 2 S1	09	0–20	1.37	0.023	2.3
Tronadora 2 S1	09	20–40	1.59	0.038	3.8
Tronadora 2 S1	17	0–20	2.26	0.18	18
Tronadora 2 S1	17	20–40	2.33	0.21	21

Nota: CC = capacidad de campo; pF = logaritmo de la tensión matricial expresada en cm de columna de agua; 1 bar = 100 kPa. Los valores corresponden a la tensión a la que se determinó la capacidad de campo en cada lote y profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de campo se alcanzó a diferentes potenciales matriciales entre fincas, lotes y profundidades, con valores de pF de 0.69 a 2.56, equivalentes a 0.5–36 kPa. Los Llanos presentó los valores más bajos y homogéneos (1.72–1.86 pF; 5–7 kPa), mientras que Palo Verde mostró valores elevados (2.43–2.56 pF; 26–36 kPa), comportamiento que puede relacionarse con su textura Franco Arcillo Arenosa, en contraste con las texturas Franco Arenosas de las demás fincas. Esto coincide con la influencia de la textura sobre la retención de humedad y con el hecho de que el potencial matricial correspondiente a CC puede variar según el tipo de suelo (FAO, 2012).

Dentro de las fincas también se observaron diferencias entre profundidades, destacando Santa Paula y Tronadora 1 por presentar los mayores cambios en el potencial matricial asociado con CC. En Santa Paula, los valores variaron de 1.70 a 2.56 pF, mientras que en Tronadora 1 oscilaron entre 0.69 y 2.26 pF. Estas diferencias evidencian que CC se alcanzó a distintos potenciales matriciales según el lote y la profundidad. Esto concuerda con Robertson *et al.* (2021), quienes señalaron que los valores de potencial matricial asociados con CC pueden variar entre suelos, aun cuando comúnmente se empleen referencias de –10 y –33 kPa.

5.4. Fase de análisis estadístico

Esta fase comprendió el procesamiento y análisis de los datos obtenidos en campo y laboratorio, mediante la aplicación de procedimientos estadísticos para caracterizar las propiedades físicas e hidráulicas del suelo y evaluar su comportamiento y variabilidad en las fincas de estudio.

5.4.1. Modelo de ajuste van Genuchten

La Tabla 16 presenta los indicadores de ajuste del modelo de van Genuchten para las curvas de retención de humedad de las fincas, lotes y profundidades evaluadas. Los valores de R^2 fueron superiores a 0.986, mientras que el RMSE varió entre 0.1128 y 0.5841 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y el MAE entre 0.0926 y 0.5136 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, indicando una alta correspondencia entre los valores experimentales y los estimados por el modelo.

Tabla 16. Coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) del ajuste del modelo de van Genuchten para las curvas de retención de humedad del suelo en cada finca y profundidad.

Finca	Lote	Profundidad (cm)	R ²	RMSE	MAE
Los Llanos	20	0–20	0.9947	0.2997	0.2724
		20–40	0.9921	0.3252	0.2807
	40	0–20	0.9948	0.3571	0.3092
		20–40	0.9971	0.2673	0.2430
Palo Verde	09	0–20	0.9980	0.1467	0.0926
		20–40	0.9988	0.1243	0.1015
	21	0–20	0.9990	0.1772	0.1282
		20–40	0.9993	0.1128	0.0993
Santa Paula	09	0–20	0.9946	0.3185	0.2400
		20–40	0.9963	0.2511	0.2044
	23	0–20	0.9983	0.1724	0.1435
		20–40	0.9913	0.2339	0.1971
	37	0–20	0.9955	0.3189	0.2644
		20–40	0.9919	0.4786	0.3122
Tronadora 1	08	0–20	0.9946	0.5299	0.4575
		20–40	0.9863	0.5841	0.4477
	10	0–20	0.9971	0.3614	0.2787
		20–40	0.9940	0.5424	0.4374
	13	0–20	0.9910	0.4650	0.3500
		20–40	0.9987	0.1433	0.1142
Tronadora 2 S1	09	0–20	0.9954	0.3728	0.3156
		20–40	0.9930	0.3995	0.3096
	17	0–20	0.9963	0.2955	0.2265
		20–40	0.9973	0.2034	0.1462
Promedio			0.9952	0.3117	0.2488

Nota: R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del error cuadrático medio; MAE = error absoluto medio.

Fuente: Elaboración propia

El ajuste del modelo fue satisfactorio en todas las curvas, con valores de R^2 superiores a 0.986. Los mayores RMSE se registraron en Tronadora 1, especialmente en el lote 08, con 0.529 y 0.5841, indicando una menor precisión en esas curvas. No obstante, los valores de R^2 fueron comparables con los valores de $R^2 > 0.98$, reportados por Romero-Campos *et al.* (2020) al ajustar curvas de retención mediante el modelo de van Genuchten en suelos agrícolas, lo que respalda la capacidad del modelo para representar la relación entre el contenido de agua y el potencial matricial.

El comportamiento observado muestra que un R^2 elevado no implica necesariamente el mismo nivel de error en todos los ajustes. Por ello, el R^2 y el RMSE deben interpretarse de manera conjunta. En este estudio, el modelo representó adecuadamente la tendencia general de las curvas, aunque los valores de RMSE mostraron diferencias en la precisión de los ajustes entre las fincas evaluadas.

La Tabla 17 presenta los parámetros obtenidos mediante el ajuste del modelo de van Genuchten a las curvas de retención de humedad, permitiendo comparar el comportamiento hidráulico de los suelos entre fincas, lotes y profundidades.

Estos parámetros permiten describir matemáticamente la relación entre el contenido de agua y el potencial matricial del suelo, proporcionando una representación cuantitativa de su comportamiento hidráulico. Su estimación para cada sitio permite disponer de información específica para interpretar las variaciones en la retención de humedad.

Tabla 17. Parámetros hidráulicos del modelo van Genuchten.

Finca	Lote	Profundidad (cm)	θ_r	θ_s	α	n	m
Los Llanos	20	0–20	0.0000	0.2627	0.014939	1.1169	0.1047
Los Llanos	20	20–40	0.0000	0.2384	0.014719	1.1146	0.1028
Los Llanos	40	0–20	0.0000	0.2864	0.011156	1.1389	0.1219
Los Llanos	40	20–40	0.0000	0.2729	0.010454	1.1513	0.1314
Palo Verde	09	0–20	0.2421	0.3556	0.001984	1.4574	0.3139
Palo Verde	09	20–40	0.2369	0.3716	0.002334	1.3677	0.2689
Palo Verde	21	0–20	0.1554	0.3517	0.002410	1.4382	0.3047
Palo Verde	21	20–40	0.2065	0.3436	0.001759	1.5818	0.3678
Santa Paula	09	0–20	0.0000	0.3078	0.002091	1.1510	0.1312
Santa Paula	09	20–40	0.0146	0.3847	0.003954	1.0960	0.0876
Santa Paula	23	0–20	0.0965	0.2837	0.003274	1.2555	0.2035
Santa Paula	23	20–40	0.0000	0.1700	0.004803	1.1302	0.1152
Santa Paula	37	0–20	0.0000	0.3927	0.016484	1.0830	0.0766
Santa Paula	37	20–40	0.2603	0.4635	0.002639	1.3500	0.2593
Tronadora 1	08	0–20	0.0000	0.3983	0.152865	1.1567	0.1355
Tronadora 1	08	20–40	0.0000	0.3275	0.030003	1.1062	0.0960
Tronadora 1	10	0–20	0.0000	0.4372	0.024613	1.1084	0.0978
Tronadora 1	10	20–40	0.0000	0.4180	0.015459	1.1284	0.1138
Tronadora 1	13	0–20	0.0481	0.2603	0.003829	1.2589	0.2056
Tronadora 1	13	20–40	0.0000	0.3135	0.004650	1.1067	0.0964
Tronadora 2 S1	09	0–20	0.1192	0.3228	0.028970	1.3002	0.2309
Tronadora 2 S1	09	20–40	0.0146	0.3186	0.020206	1.1147	0.1029
Tronadora 2 S1	17	0–20	0.1178	0.2947	0.003672	1.3557	0.2624
Tronadora 2 S1	17	20–40	0.2299	0.3666	0.003029	1.3989	0.2852

Nota: θ_r = contenido de agua residual; θ_s = contenido de agua a saturación; α = parámetro relacionado con la entrada de aire; n y m = parámetros de forma de la curva de retención, según el modelo de van Genuchten (1980). Los valores de θ_r y θ_s se expresan en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros del modelo mostraron variación entre fincas y profundidades. El contenido de agua a saturación (θ_s) presentó los mayores valores en Santa Paula lote 37 ($0.464 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y Tronadora 1 lote 10 ($0.437 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$), mientras que los menores se observaron en Santa Paula lote 23 ($0.170 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y Los Llanos lote 20 ($0.238 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Estas diferencias reflejan cambios en la distribución de los poros y en las propiedades físicas de los suelos. El modelo de van Genuchten permite representar estas variaciones mediante parámetros ajustados a las curvas de retención (van Genuchten, 1980).

El parámetro α también presentó diferencias entre fincas, con valores de 0.1529 en Tronadora 1 lote 08 y 0.0018 en Palo Verde lote 09, mientras que n varió de 1.0830 a 1.5818 y m de 0.0766 a 0.3678. Estas diferencias reflejan cambios en la forma de las curvas y en la respuesta del suelo ante incrementos del potencial matricial. En conjunto, la variabilidad de los parámetros evidencia diferencias en el comportamiento hidráulico entre fincas, lotes y profundidades, justificando el ajuste individual de las curvas.

5.4.2. Construcción y ajuste de las curvas de retención de humedad

A partir de los contenidos de humedad determinados mediante la olla de presión Richards a diferentes potenciales matriciales, se construyeron y ajustaron las curvas de retención de humedad mediante el modelo de van Genuchten para las profundidades de 0–20 y 20–40 cm.

En la Figura 14 se presentan las curvas de retención de humedad de los lotes 20 y 40 de Los Llanos, evaluadas a 0–20 y 20–40 cm.

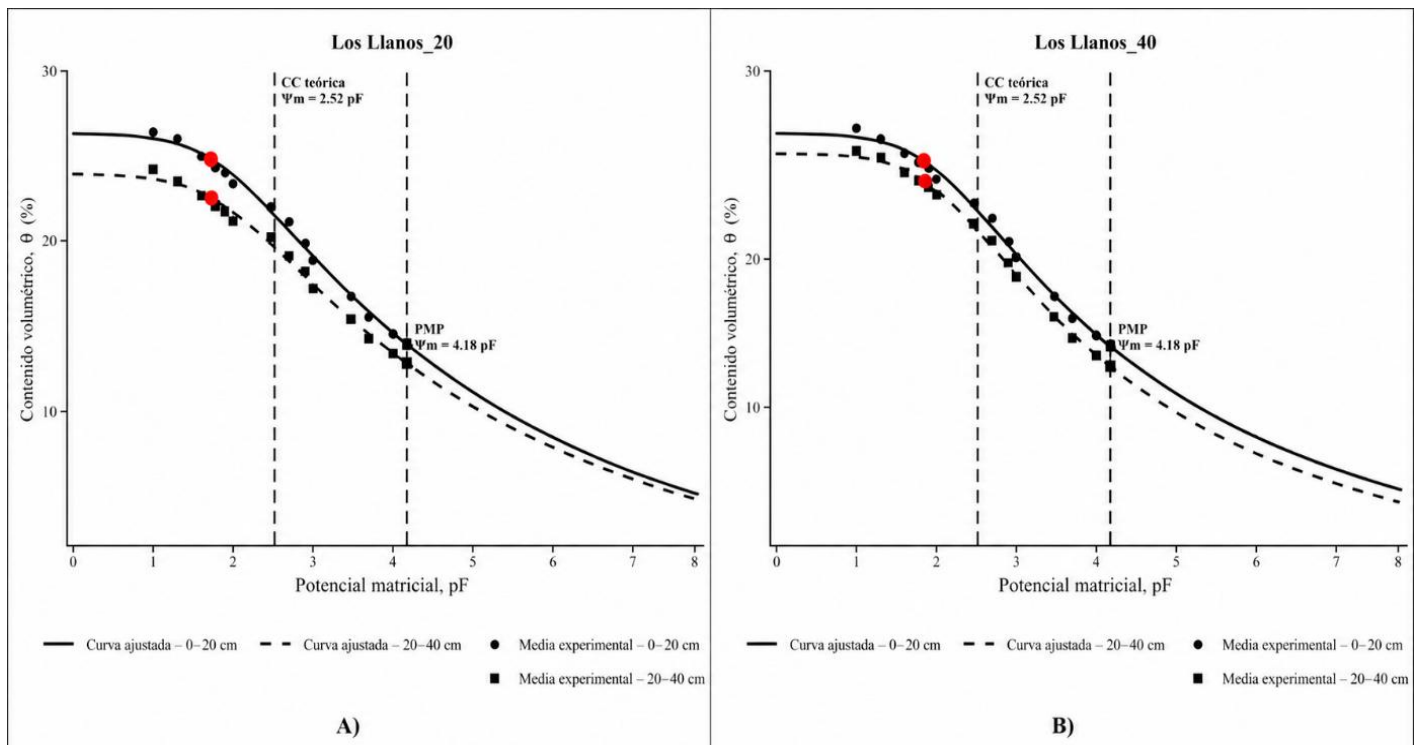


Figura 14. Curvas de retención de humedad para la finca Los Llanos. A) Lote 20; B) Lote 40.

Nota: El punto color rojo corresponde a CC específico para esa curva, evidenciando que el valor de potencial matricial para CC no es el mismo para todos los tipos de suelos.

Fuente: Elaboración propia

Los lotes 20 y 40 presentaron densidades aparentes de 1.69 y 1.59 g cm⁻³, respectivamente. De acuerdo con USDA-NRCS (2022), para suelos franco arenosos ambos valores se encuentran por encima de la condición favorable (<1.40 g cm⁻³); además, el lote 20 supera el valor de 1.63 g cm⁻³ asociado con posibles efectos sobre el crecimiento radicular, mientras que ninguno alcanza el nivel restrictivo (>1.80 g cm⁻³). La porosidad total fue de 33.30 y 36.69 %, respectivamente, mostrando menor espacio poroso en el lote 20, coherente con su mayor densidad aparente. Esta relación entre densidad, porosidad y retención de agua coincide con Rawls et al. (1982), quienes incluyeron ambas propiedades junto con la textura y la materia orgánica como variables relacionadas con la retención hídrica.

Las curvas presentaron un comportamiento similar, aunque el lote 40 retuvo más agua que el lote 20. La CC promedio fue de 0.237 cm³ cm⁻³ en el lote 20 y 0.261 cm³ cm⁻³ en el lote 40, calculada a partir de los valores obtenidos en 0–20 y 20–40 cm; las tensiones asociadas fueron aproximadamente pF 1.72 (5 kPa) para el lote 20 y pF 1.84 (7 kPa) para el lote 40. La mayor CC del lote 40 es consistente con su menor DA y mayor PO, mientras que la similitud textural limita la separación entre las curvas. Rawls et al. (1982) señalan que la textura, la DA y la MO contribuyen a explicar la variación de la retención de agua, aunque la importancia relativa de estas variables cambia con la tensión.

El AD promedio fue de aproximadamente 0.112 cm³ cm⁻³ para el lote 20 y 0.118 cm³ cm⁻³ para el lote 40. Para los 40 cm evaluados, estos valores representan aproximadamente 44.6 y 47.0 mm, equivalentes a 446 y 470 m³ ha⁻¹, respectivamente. Por tanto, el lote 40 dispone de cerca de 2.4 mm (24 m³ ha⁻¹) adicionales de agua potencialmente aprovechable. Esta diferencia, aunque moderada, indica que el lote 20 requeriría una reposición ligeramente más frecuente bajo igual demanda evaporativa; sin embargo, la frecuencia y lámina de riego deben definirse

con el umbral de agotamiento permitido y la ETC, evitando aproximarse al PMP. La relación entre textura, propiedades físicas y almacenamiento de agua es consistente con Rawls et al. (1982), mientras que el efecto de la densidad sobre la retención puede variar según el rango de tensión considerado.

En la Figura 15 se presentan las curvas de retención de humedad de los lotes 09 y 21 de Palo Verde, evaluadas a 0–20 y 20–40 cm.

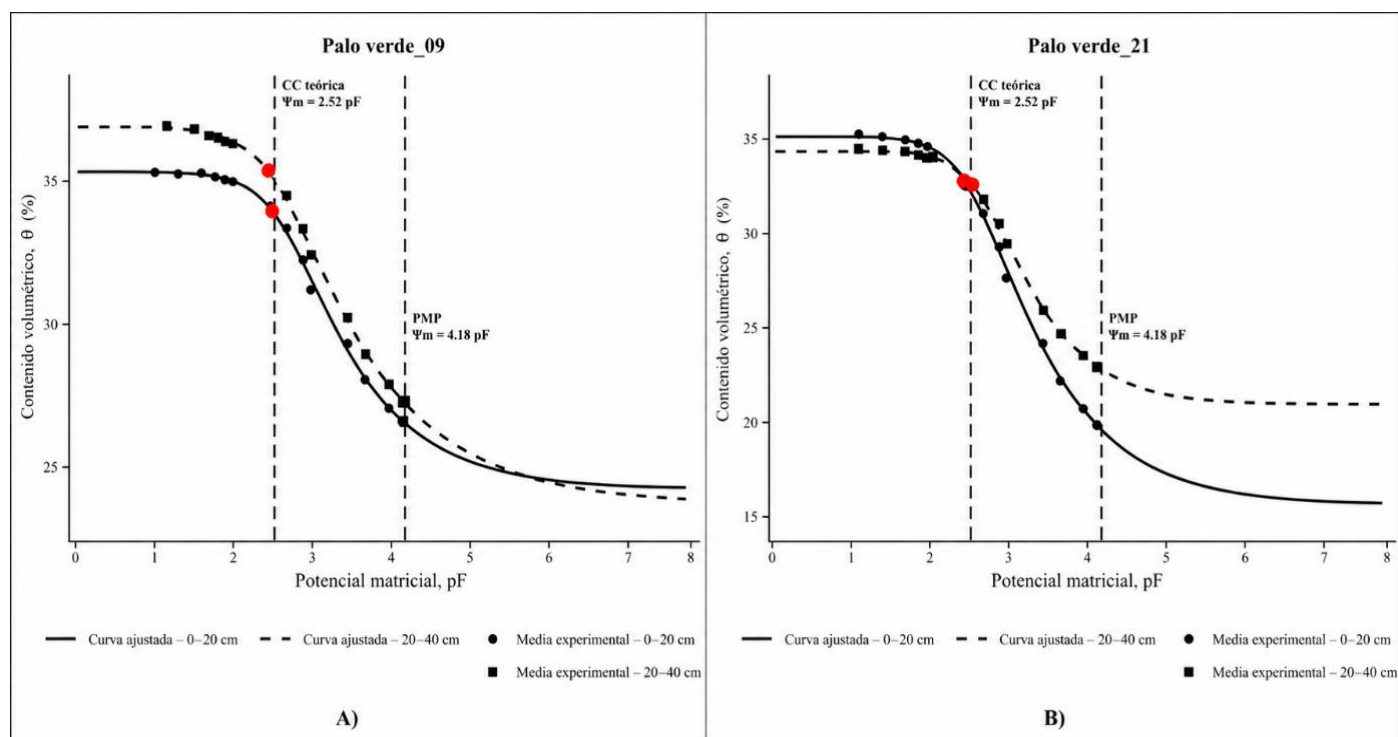


Figura 15. Curvas de retención de humedad para la finca Palo Verde. A) Lote 09; B) Lote 21.

Nota: El punto color rojo corresponde a CC específico para esa curva, evidenciando que el valor de potencial matricial para CC no es el mismo para todos los tipos de suelos.

Los lotes 09 y 21 presentaron densidades aparentes de 1.59 y 1.58 g cm^{-3} , respectivamente, con porosidades totales de 33.90 y 34.03% . La diferencia entre ambos lotes fue pequeña, por lo que las condiciones de espacio poroso fueron similares. Sin embargo, el lote 09 presentó textura franco arcillo arenosa, mientras que el lote 21 fue franco arenosa, diferencia que resulta relevante para explicar la retención de agua. Rawls *et al.* (1982) y Saxton y Rawls (2006)

señalan que la textura, junto con la densidad aparente y la materia orgánica, condiciona la cantidad de agua retenida a diferentes potenciales matriciales.

Las curvas mostraron un mayor contenido de humedad cercano a saturación en el lote 09, especialmente en el intervalo correspondiente a la capacidad de campo. La CC promedio fue de $0.34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 09 y $0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 21; los valores de CC se alcanzaron aproximadamente entre pF 2.43 y 2.56. Aunque la DA y la PO fueron prácticamente iguales, la mayor proporción de partículas finas del lote 09 favoreció la retención capilar, particularmente a tensiones mayores. Este comportamiento coincide con Saxton y Rawls (2006), quienes demostraron que la textura y la materia orgánica permiten explicar diferencias en las características de retención hídrica; por tanto, en este caso la diferencia textural parece tener mayor importancia que la pequeña diferencia de DA entre lotes.

Un comportamiento similar fue reportado por Aregahegn et al. (2026), quienes encontraron que los suelos evaluados presentaron valores de capacidad de campo entre 21.24 y 32.78 %, punto de marchitez permanente entre aproximadamente 14 y 24 % y agua disponible entre 6.30 y 15.49 %. Los autores observaron que los suelos con mayor retención no necesariamente presentaron la mayor cantidad de agua disponible, debido a que el incremento simultáneo del agua retenida al PMP reducía el intervalo aprovechable. Este comportamiento coincide con Palo Verde lote 09, donde los mayores valores de CC estuvieron acompañados por un PMP elevado y un AD reducido.

En la Figura 16 se presentan las curvas de retención de humedad correspondientes a los lotes 09 y 23 de Santa Paula, evaluadas en las profundidades de 0–20 y 20–40 cm.

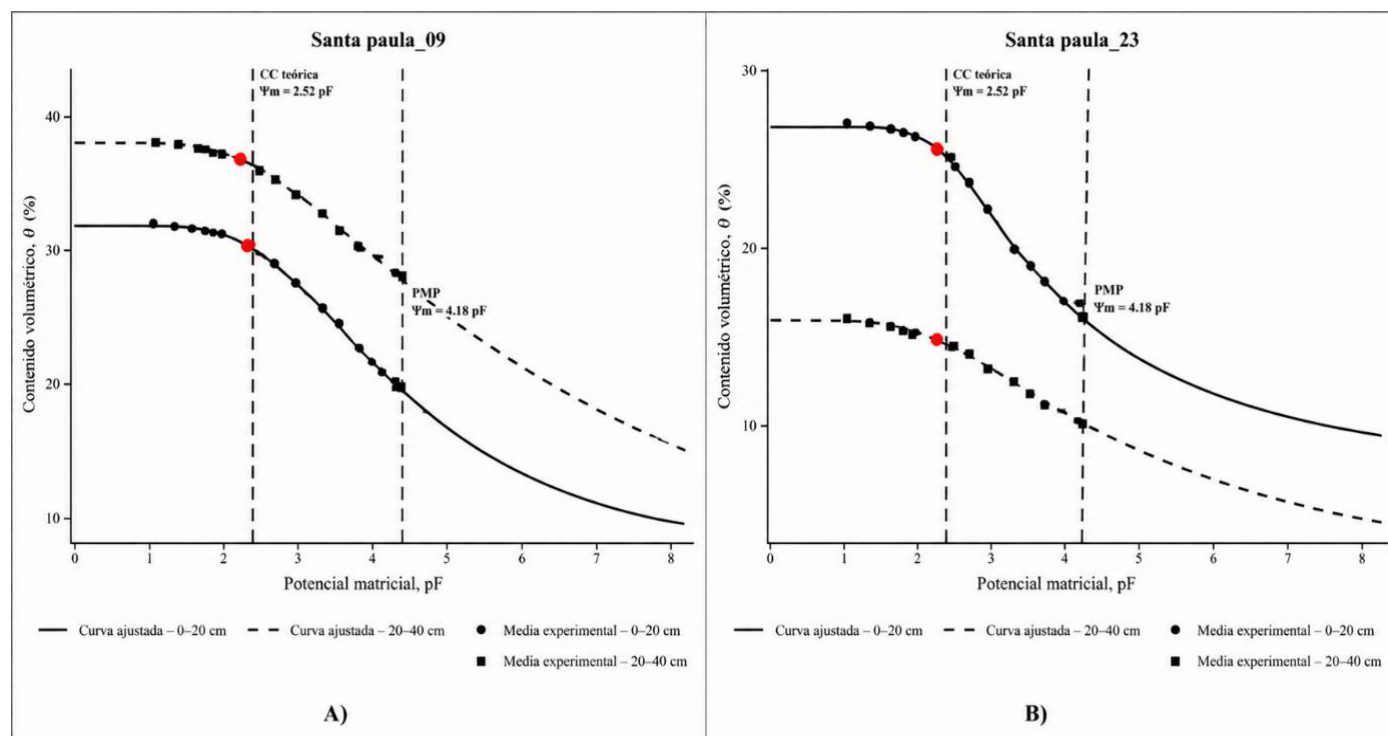


Figura 16. Curvas de retención de humedad para la finca Santa Paula. A) Lote 09; B) Lote 23.

Nota: El punto color rojo corresponde a CC específico para esa curva, evidenciando que el valor de potencial matricial para CC no es el mismo para todos los tipos de suelos.

Fuente: Elaboración propia

En Santa Paula, ambos lotes presentaron textura franco arenosa, por lo que la marcada diferencia entre sus curvas se relacionó principalmente con otras propiedades físicas. El lote 09 registró 1.56 g cm^{-3} de densidad aparente, 35.1 % de porosidad y 2.05 % de materia orgánica, valores que representan una condición intermedia para un suelo franco arenoso (Kay y Angers, 1999). El lote 23 alcanzó 1.87 g cm^{-3} , con 26.2 % de porosidad y 0.33 % de MO, clasificándose como una densidad alta y potencialmente restrictiva para el crecimiento radical, al superar 1.80 g cm^{-3} (USDA-NRCS, 2022).

Las curvas mostraron una mayor retención de humedad en el lote 09 que en el lote 23, comportamiento consistente con las diferencias observadas en sus propiedades físicas. La CC media fue de $0.320 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 09 y de $0.205 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 23, mientras que los valores de pF asociados a la CC variaron entre 2.31 y 2.56. La mayor retención del lote 09 puede relacionarse con su menor densidad aparente, mayor porosidad y mayor contenido de materia orgánica, factores que, de acuerdo con Saxton y Rawls (2006), intervienen en la estimación de las características de retención de humedad. Por tanto, aunque ambos lotes presentan la misma clase textural, su comportamiento hidráulico no fue equivalente.

La diferencia en retención también se reflejó en el agua disponible, con una lámina de 41.2 mm en el lote 09 y 32.4 mm en el lote 23 para los 0–40 cm de profundidad, equivalentes a 412 y 324 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. Así, el lote 09 almacenó 8.8 mm más de agua disponible, diferencia que representa 88 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ adicionales. Este resultado coincide con el planteamiento de Saxton y Rawls (2006), según el cual las propiedades físicas del suelo condicionan el almacenamiento de agua y su disponibilidad para las plantas. Desde el punto de vista del riego, la menor reserva de agua del lote 23 implica una menor capacidad de almacenamiento entre CC y PMP, por lo que su reposición podría requerirse antes que en el lote 09 para evitar una reducción excesiva de la humedad aprovechable.

En la Figura 17 se presentan las curvas de retención de humedad correspondientes a los lotes 37 de Santa Paula y 08 de Tronadora 1, evaluados a las profundidades de 0–20 y 20–40 cm. Las curvas muestran la disminución del contenido de humedad conforme aumenta el potencial matricial, evidenciando diferencias en la cantidad de agua retenida y en la pendiente de las curvas entre profundidades. Estas variaciones reflejan cambios en la capacidad de retención de agua de los suelos y permiten identificar comportamientos contrastantes en la forma en que el agua es liberada a medida que aumenta la tensión.

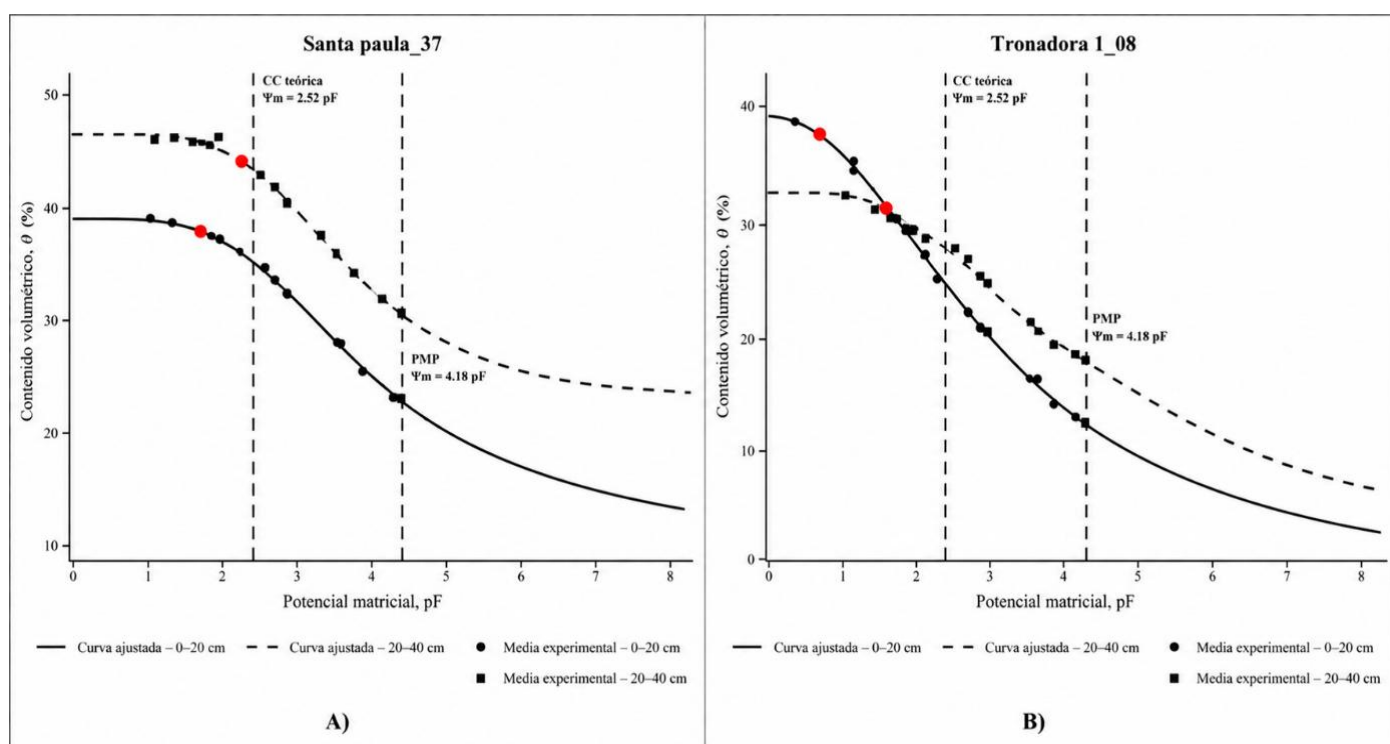


Figura 17. Curvas de retención de humedad para la finca Santa Paula. A) Lote 37; Tronadora 1, B) Lote 08.

Nota: El punto color rojo corresponde a CC específico para esa curva, evidenciando que el valor de potencial matricial para CC no es el mismo para todos los tipos de suelos.

Fuente: Elaboración propia

En Santa Paula lote 37 y Tronadora 1 lote 08, las diferencias en las curvas se relacionaron con las propiedades físicas de cada lote. Santa Paula lote 37 presentó una DA de 1.40 g cm^{-3} y

Tronadora 1 lote 08 de 1.15 g cm^{-3} ; para suelos franco arenosos, el primer valor se encuentra en el límite considerado favorable y el segundo representa una densidad baja, según los rangos del USDA-NRCS (2022). Asimismo, la porosidad fue de 42.7 y 49.3 %, respectivamente, indicando una mayor proporción de espacio poroso en Tronadora 1 lote 08. Estas diferencias condicionaron la cantidad de agua almacenada y el comportamiento de las curvas a lo largo del potencial matricial.

La curva de Tronadora 1 lote 08 mostró una mayor retención de agua disponible respecto a Santa Paula 37, aunque ambos lotes presentaron una CC promedio de 0.34 y $0.40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente. En Santa Paula lote 37, la CC aumentó de $0.37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en 0–20 cm a $0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en 20–40 cm, mientras que en Tronadora 1 lote 08 disminuyó de 0.37 a $0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Este comportamiento muestra que las propiedades físicas cambian a lo largo del perfil del suelo. Saxton y Rawls (2006) destacan precisamente que la retención depende de la interacción entre textura, materia orgánica y características físicas del suelo, por lo que la porosidad total por sí sola no permite explicar completamente la forma de la curva.

Estas diferencias se reflejaron en el agua disponible: Santa Paula lote 37 acumuló 50.4 mm en los 40 cm evaluados, mientras que Tronadora 1 lote 08 alcanzó 78.2 mm, equivalente a una diferencia de 27.8 mm o $278 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Esta mayor lámina de agua útil indica que Tronadora 1 lote 08 posee una mayor capacidad para almacenar agua antes de requerir reposición, por lo que podría admitir intervalos de riego potencialmente más amplios. Sin embargo, esta reserva no debe agotarse hasta el PMP, sino manejarse mediante un umbral de agua fácilmente disponible, ajustando la lámina y la frecuencia de riego según la ET_c y el seguimiento del potencial matricial del suelo, evitando aplicar un mismo criterio de riego para ambos lotes.

En la Figura 18 se presentan las curvas de retención de humedad correspondientes a los lotes 10 y 13 de Tronadora 1, evaluados a 0–20 y 20–40 cm. Las curvas muestran una disminución del contenido de humedad conforme aumenta el potencial matricial, con diferencias en la cantidad de agua retenida entre profundidades. El lote 10 presentó un comportamiento más similar entre ambas profundidades, mientras que el lote 13 mostró una mayor separación entre sus curvas.

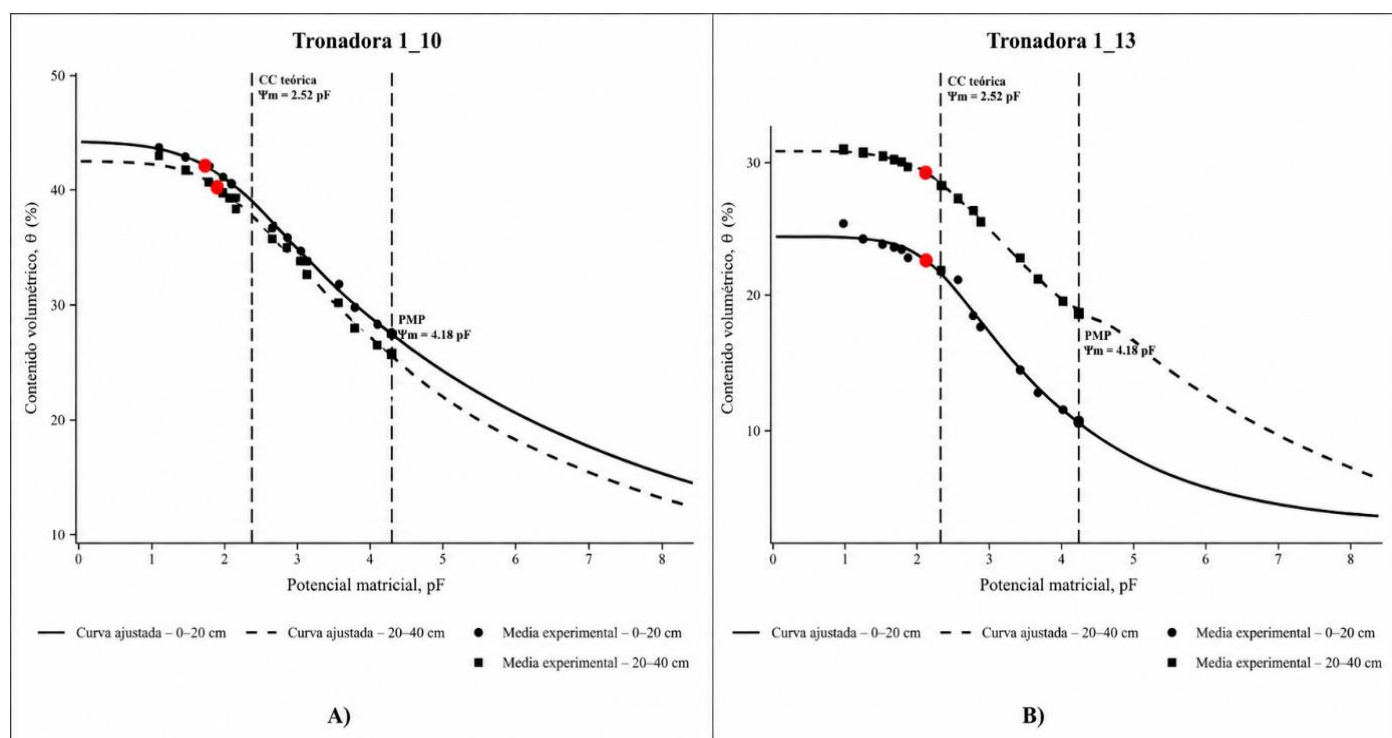


Figura 18. Curvas de retención de humedad para la finca Tronadora 1. A) Lote 10; B) Lote 13.

Nota: Los puntos corresponden a los valores experimentales obtenidos a las diferentes tensiones. El punto rojo corresponde a CC específico para esa curva.

Fuente: Elaboración propia

En Tronadora 1, los lotes 10 y 13 presentaron una densidad aparente de 1.14 y 1.46 g cm⁻³, respectivamente, correspondientes a condiciones de densidad baja a moderada para texturas gruesas (USDA-NRCS, 2017). Asimismo, la porosidad total fue de 49.6 % en el lote 10 y 40.0 % en el lote 13, reflejando un mayor espacio poroso en el primer lote (Dexter, 2004). Estas diferencias se reflejaron en las curvas, ya que el lote 10 presentó mayores contenidos de humedad a capacidad de campo que el lote 13.

Esta respuesta también estuvo asociada con el contenido de materia orgánica, de 3.04 % en el lote 10 y 1.55 % en el lote 13. La combinación de menor densidad, mayor porosidad y mayor materia orgánica en el lote 10 favoreció una mayor retención de agua, mientras que las condiciones físicas del lote 13 limitaron su capacidad de almacenamiento. Este comportamiento coincide con lo señalado por Rawls *et al.* (2003), aunque Saxton y Rawls (2006) indican que, en suelos franco arenosos, la textura también tiene una influencia importante sobre la retención.

A capacidad de campo, el lote 10 presentó un contenido de humedad de 0.41 cm³ cm⁻³ a pF 1.51, mientras que el lote 13 registró 0.24 cm³ cm⁻³ a pF 2.26, evidenciando una mayor capacidad de retención de agua en lote 10. Esta diferencia se reflejó en una reserva de agua disponible de 73.4 mm (734 m³ ha⁻¹) para el lote 10 y 43.0 mm (430 m³ ha⁻¹) para el lote 13, con una diferencia de 30.4 mm (304 m³ ha). En la aplicación del riego al cultivo de caña de azúcar, esta variación indica que la lámina y frecuencia deben ajustarse considerando la concentración de raíces en los primeros horizontes del suelo, donde se concentra gran parte de la extracción de agua por el cultivo. Es así que el riego debe orientarse a mantener una humedad adecuada evitando tanto el déficit hídrico como la aplicación excesiva de agua.

En la Figura 19 se presentan las curvas de retención de humedad correspondientes a los lotes 09 y 17 de Tronadora 2 S1, evaluadas en las profundidades de 0–20 y 20–40 cm.

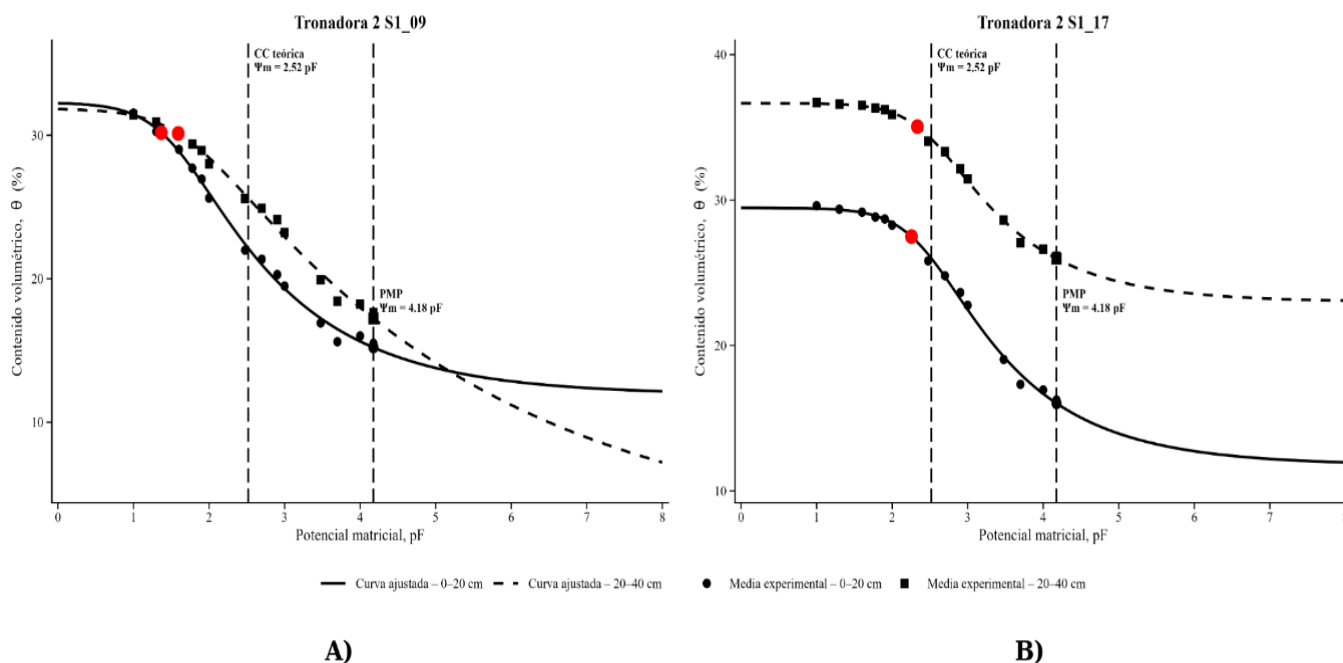


Figura 19. Curvas de retención de humedad para la finca Tronadora 2 S1. A) Lote 09; B) Lote 17.

Nota: Los puntos corresponden a los valores experimentales obtenidos a las diferentes tensiones. El punto rojo corresponde a CC específico para esa curva.

Fuente: Elaboración propia

En Tronadora 2 S1, los lotes 09 y 17 registraron densidades aparentes de 1.63 y 1.70 g cm^{-3} y porosidades de 31.4% y 36.7% , respectivamente, junto con contenidos de materia orgánica de 1.42% y 1.68% . Para una textura franco arenosa, estos valores reflejan condiciones de densidad moderadas a relativamente altas que alteran la distribución del espacio poroso (USDA-NRCS, 2017). Esta arquitectura porosa y el aporte orgánico condicionaron la retención a diferentes potenciales matriciales (Dexter, 2004; Saxton y Rawls, 2006). Estos resultados coinciden con Rawls et al. (2003) sobre la influencia de la porosidad estructural en la dinámica hídrica, aunque difieren de estudios que atribuyen la retención a altas tensiones únicamente a la matriz mineral.

Las curvas mostraron un comportamiento diferenciado entre ambos lotes. El lote 17 presentó una CC media de $0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ligeramente superior a la del lote 09 ($0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); sin embargo, en el lote 17 la CC aumentó de 0.275 a $0.350 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ entre 0–20 y 20–40 cm, mientras que en el lote 09 permaneció prácticamente constante (0.302 y $0.301 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Este comportamiento es consistente con Rawls et al. (1982), quienes encontraron que las propiedades físicas del suelo permiten explicar diferencias en el contenido de agua a distintos potenciales, aunque la respuesta no depende de una sola propiedad. En este caso, la mayor CC del lote 17 no se tradujo en una mayor disponibilidad de agua.

Estas diferencias físicas determinaron una reserva de Agua Disponible (AD) de 55.8 mm ($558 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en el lote 09 frente a 41.2 mm ($412 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en el lote 17 para el perfil de 0–40 cm. La menor AD en el lote 17, a pesar de su mayor humedad a CC en 20–40 cm, ocurre porque una fracción significativa del agua permanece retenida a potenciales cercanos al PMP, reduciendo el agua aprovechable por el sistema radicular de la caña de azúcar. La diferencia de 14.6 mm ($146 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) representa una reserva aprovechable 35.4 % mayor en el lote 09, por lo que la lámina y frecuencia de riego deben ajustarse según el agua efectivamente disponible en la zona radicular del cultivo (Allen *et al.*, 1998).

5.4.3. Comparación de las curvas de retención de humedad entre fincas

Las curvas de retención de humedad mostraron diferencias entre las cinco fincas y los 12 lotes evaluados, evidenciando que el contenido de humedad varió tanto entre fincas como entre lotes de una misma finca. Tronadora 1, particularmente los lotes 08 y 10, registró las menores densidades aparentes (1.15 y 1.14 g cm^{-3}) y las mayores porosidades totales (49.3 y 49.6 %), mientras que Santa Paula lote 23 presentó la mayor densidad aparente (1.87 g cm^{-3}) y la menor porosidad (26.2 %). Estas diferencias condicionaron el espacio poroso disponible para el almacenamiento y la retención de agua, lo que se reflejó en la distinta posición y amplitud de las curvas de humedad a lo largo del potencial matricial.

La variabilidad entre las curvas también se reflejó en las constantes hídricas. En Palo Verde, los lotes 09 y 21 presentaron valores de CC entre 0.32 y $0.35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mientras que en Santa Paula

se observó un rango más amplio, desde $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 23 hasta $0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en el lote 37. Esta diferencia coincide con la variabilidad física entre los lotes, particularmente en Santa Paula, donde la densidad aparente varió de 1.40 g cm^{-3} en el lote 37 a 1.87 g cm^{-3} en el lote 23, acompañada por porosidades de 42.7 y 26.2 %, respectivamente.

La materia orgánica también contribuyó a la variabilidad entre los lotes. Los Llanos presentó valores de 2.04–2.09 %, mientras que Tronadora 1 lote 08 y Santa Paula lote 23 registraron 0.80 y 0.33 %, respectivamente. Sin embargo, un mayor contenido de materia orgánica no se tradujo directamente en una mayor retención, debido a su interacción con la densidad, porosidad y composición granulométrica. En concordancia, Li *et al.* (2024) encontraron una respuesta no lineal, con incrementos significativos del agua disponible únicamente en determinados intervalos de carbono orgánico.

Amsili *et al.*, (2024), desarrollaron funciones para CC, PMP y agua disponible utilizando una base de 7,232 muestras que incluyó, entre otras variables, la textura y la materia orgánica, lo que respalda la influencia conjunta de estas propiedades sobre el comportamiento hídrico. Resultados de Ghiberto et al. mostraron que, con densidades entre 1.09 y 1.49 Mg m^{-3} , la CC alcanzó $0.36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y el agua disponible $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, evidenciando que la distribución del espacio poroso y las demás propiedades físicas también condicionan la retención de humedad.

5.4.4 Prueba de normalidad de los datos

La Tabla 18 muestra la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk donde se aplicó como una etapa previa al análisis de correlación, con el propósito de determinar la distribución de las variables físicas del suelo y establecer un criterio estadístico para seleccionar posteriormente el método de correlación más adecuado. Esta evaluación fue necesaria debido a que las propiedades físicas consideradas como posibles variables explicativas para las funciones de pedotransferencia (FPT) pueden presentar diferentes comportamientos en la distribución de sus datos.

Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables analizadas

Variable	N	W_Shapiro	P_valor	Alpha	Decisión	Interpretación
A	24	0,7939	0,000234	0,05	Rechazar H0	Se rechaza la normalidad
CE	24	0,7334	0,000029	0,05	Rechazar H0	Se rechaza la normalidad
DA	24	0,9304	0,099308	0,05	No rechazar H0	No se rechaza la normalidad
Dr	24	0,8847	0,010349	0,05	Rechazar H0	Se rechaza la normalidad
L	24	0,8942	0,016273	0,05	Rechazar H0	Se rechaza la normalidad
MO	24	0,9679	0,61535	0,05	No rechazar H0	No se rechaza la normalidad
PO	24	0,952	0,299405	0,05	No rechazar H0	No se rechaza la normalidad
R	24	0,7584	0,000066	0,05	Rechazar H0	Se rechaza la normalidad

Nota: A = arena; L = limo; R = arcilla; DA = densidad aparente; Dr = densidad real; PO = porosidad total; MO = materia orgánica; CE = conductividad eléctrica; N = número de observaciones; W = estadístico de Shapiro-Wilk. Se consideró $\alpha = 0.05$; valores de $p < 0.05$ indican rechazo de la hipótesis nula de normalidad.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que DA, MO y PO no presentaron evidencia suficiente para rechazar la normalidad, con valores de p de 0.0993, 0.6154 y 0.2994, respectivamente. En cambio, A, CE, Dr, L y R presentaron valores de p inferiores a 0.05, por lo que se rechazó la hipótesis de normalidad. Esto indica que la distribución de las variables no fue homogénea, aspecto que debe considerarse en la selección de los procedimientos estadísticos posteriores.

La falta de normalidad en las fracciones texturales (A, L y R) puede estar relacionada con su naturaleza composicional, debido a que estas variables representan proporciones que conjuntamente describen la distribución granulométrica del suelo. La DA, MO y PO mostraron un comportamiento compatible con una distribución normal dentro del conjunto evaluado. Ante estas diferencias, resulta conveniente utilizar procedimientos que no dependan estrictamente del supuesto de normalidad, especialmente para analizar las relaciones entre las propiedades.

La prueba de normalidad permitió establecer un criterio estadístico inicial para la selección del método de correlación; sin embargo, este resultado no constituyó por sí solo el criterio para definir las variables empleadas en las funciones de pedotransferencia. En este sentido, DA, MO y PO presentaron distribución normal, por lo que inicialmente se consideró el uso de Pearson, mientras que A, CE, Dr, L y R, al no cumplir este supuesto, se consideraron para Spearman. No obstante, la selección definitiva del coeficiente también dependió del comportamiento de la relación entre las variables, por lo que posteriormente se realizó el análisis de linealidad.

5.4.5. Análisis de linealidad de las tendencias

Con el propósito de identificar las variables con comportamiento adecuado para integrarse en el desarrollo de las funciones de pedotransferencia (FPT),. En la siguiente Tabla 19, se muestran los resultados de la prueba de linealidad en las variables analizadas. Para evaluar la linealidad se analizó la relación entre densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad total (PO), conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO), considerando el coeficiente de determinación (R^2) del ajuste lineal y la significancia del término cuadrático como indicador de posibles desviaciones de la linealidad.

Tabla 19. Prueba de linealidad y presencia de curvatura entre las propiedades físicas del suelo.

Relación	R^2 lineal	Evidencia de curvatura (p)	Interpretación
DA-DR	0.509	0.771	Lineal
DA-PO	0.879	0.428	Lineal
DA-CE	0.078	0.639	Lineal, relación débil
DA-MO	0.062	0.397	Lineal, relación débil
DR-PO	0.182	0.0047	No lineal
DR-CE	0.001	0.694	Sin tendencia lineal definida
DR-MO	0.013	0.264	Sin tendencia lineal definida
PO-CE	0.147	0.770	Lineal, relación débil
PO-MO	0.065	0.405	Lineal, relación débil
CE-MO	0.054	0.333	Lineal, relación débil

Nota: R^2 lineal = coeficiente de determinación del modelo lineal; p = p-valor de la prueba de curvatura (término cuadrático). Un valor de $p < 0.05$ indica evidencia estadísticamente significativa de no linealidad.

Variables: DA = Densidad Aparente; DR = Densidad Real; PO = Porosidad; CE = Conductividad Eléctrica; MO = Materia Orgánica.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostraron que la relación entre DA y DR presentó un ajuste lineal con un R^2 de 0.509, mientras que la relación entre DA y PO presentó el mayor grado de ajuste lineal, con un R^2 de 0.879. Las relaciones DA–CE y DA–MO mostraron valores de R^2 de 0.078 y 0.062, respectivamente. Para las relaciones que involucraron DR, se obtuvieron valores de R^2 de 0.182 para DR–PO, 0.001 para DR–CE y 0.013 para DR–MO. Por otra parte, las relaciones PO–CE, PO–MO y CE–MO presentaron valores de R^2 de 0.147, 0.065 y 0.054, respectivamente.

En la mayoría de las relaciones evaluadas, el término cuadrático no fue significativo ($p > 0.05$), lo que indica que no se detectaron evidencias estadísticas de una tendencia curvilínea. Sin embargo, la relación entre DR y PO presentó un término cuadrático significativo ($p = 0.0047$), lo que evidenció una desviación respecto a un comportamiento estrictamente lineal. Este resultado fue considerado al momento de interpretar las asociaciones entre las propiedades físicas y evitar asumir una relación lineal cuando los datos no mostraron dicho comportamiento.

La evaluación de la linealidad permitió identificar diferencias en el comportamiento de las variables físicas y establecer un criterio adicional para la selección del método de correlación. La relación entre DA y PO presentó el mayor ajuste lineal, lo que indica una asociación consistente entre ambas propiedades dentro del conjunto de muestras analizadas. En contraste, las relaciones que involucraron CE y MO presentaron bajos valores de R^2 , indicando una limitada capacidad del modelo lineal para explicar la variación conjunta de estas propiedades.

5.4.6. Selección del coeficiente de correlación

En la tabla 20 se observan los resultados obtenidos en la prueba de normalidad y linealidad donde se compararon los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman obtenidos para las propiedades físicas del suelo. El propósito de esta comparación fue establecer cuál medida de asociación resultaba más apropiada para el conjunto de variables analizadas.

La prueba de normalidad mostró que no todas las variables cumplieron el supuesto de distribución normal, debido a que densidad real (DR) y conductividad eléctrica (CE) presentaron valores de p inferiores a 0.05. Asimismo, el análisis de linealidad mostró que la relación DR–PO presentó evidencia de comportamiento curvilíneo.

Tabla 20. Comparación de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman entre las propiedades físicas del suelo

Relación	Pearson (r)	Spearman (ρ)
DA–DR	0.713	0.723
DA–PO	–0.937	–0.874
DA–CE	0.279	0.260
DA–MO	–0.249	–0.085
DR–PO	–0.426	–0.446
DR–CE	–0.029	0.127
DR–MO	–0.115	–0.174
PO–CE	–0.383	–0.397
PO–MO	0.255	0.097
CE–MO	–0.231	–0.273

Nota: CE = Conductividad eléctrica; DA = Densidad aparente; DR = Densidad real; MO = Materia orgánica; PO = Porosidad total.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostraron que las principales relaciones entre las propiedades físicas conservaron la misma dirección mediante ambos métodos de correlación. La relación negativa entre la densidad aparente (DA) y la porosidad (PO) indica que, a medida que aumenta la compactación del suelo, disminuye el espacio poroso disponible. Las relaciones positivas observadas entre las demás variables reflejan que sus valores tienden a aumentar de manera conjunta. Estas asociaciones permiten interpretar cómo la interacción entre las propiedades físicas puede influir en la distribución del espacio poroso y en el comportamiento de la retención de humedad del suelo.

Se observaron variaciones en la magnitud de algunas asociaciones, especialmente entre DA–MO y PO–MO. Pearson registró coeficientes de –0.249 y 0.255, respectivamente, mientras que Spearman presentó valores de –0.085 y 0.097, evidenciando cambios en la intensidad de dichas

asociaciones según el método empleado. Considerando la falta de normalidad observada en DR y CE, así como la desviación de la linealidad en la relación DR–PO, se seleccionó el coeficiente de Spearman (ρ) para interpretar las relaciones entre las propiedades físicas. De esta manera, se empleó un método no paramétrico más adecuado a las características observadas en el conjunto de datos y se mantuvo un criterio estadístico uniforme para el análisis.

5.4.7. Análisis de correlación entre las propiedades físicas del suelo

Una vez seleccionado el coeficiente de correlación de Spearman, de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis previo de normalidad y linealidad de las variables, se evaluaron las asociaciones entre las propiedades físicas y texturales del suelo. El análisis permitió identificar la magnitud y dirección de las relaciones entre arena (A), limo (L), arcilla (R), densidad aparente (Da), densidad real (Dr), porosidad total (PO), conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO).

En la Figura 20 se presenta la matriz de correlación de Spearman obtenida a partir de los valores de las propiedades físicas y texturales correspondientes a los 12 lotes evaluados en las cinco fincas, considerando las profundidades de 0–20 y 20–40 cm, para un total de 24 observaciones. En general, se observaron asociaciones de diferente magnitud y dirección, destacándose principalmente las relaciones entre las fracciones texturales y las propiedades relacionadas con la densidad y la porosidad.

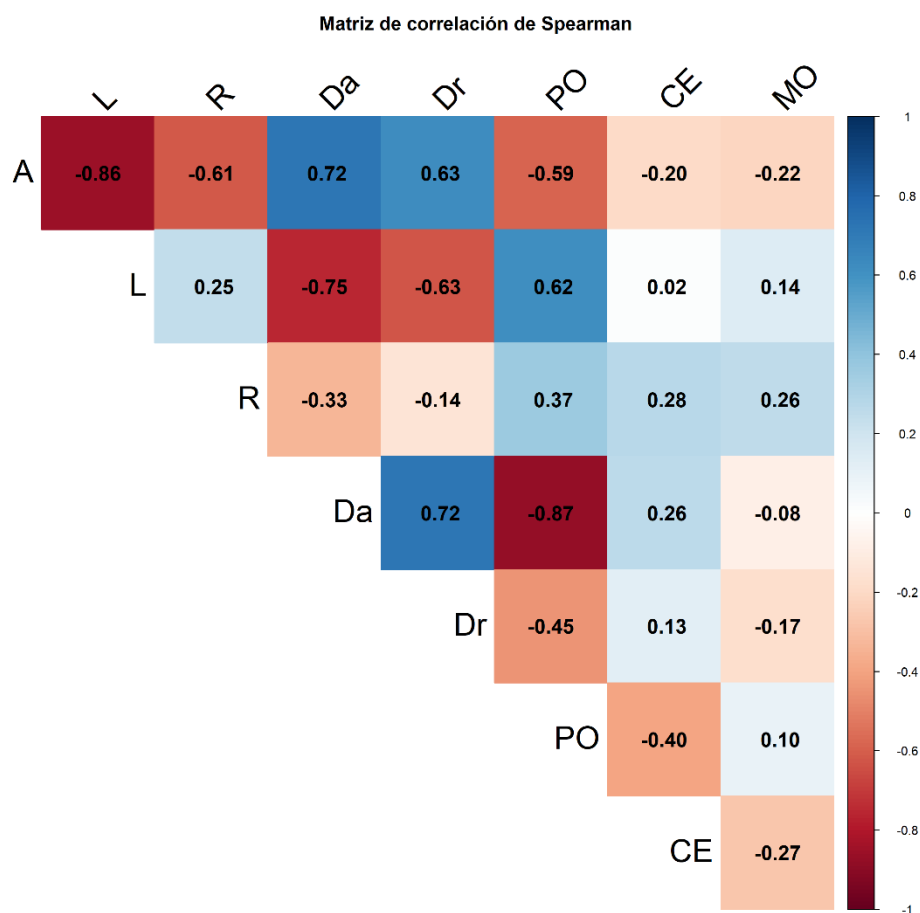


Figura 20. Matriz general de correlación de Spearman entre las propiedades físicas del suelo.

Nota: A = Arena; L = Limo; R = Arcilla; CE = Conductividad eléctrica; DA = Densidad aparente; DR = Densidad real; MO = Materia orgánica; PO = Porosidad total. Los valores corresponden a los coeficientes de correlación de Spearman (ρ). Los valores positivos indican una relación directa y los negativos una relación inversa entre las variables.

Fuente: Elaboración propia

La fuerte correlación negativa entre Da y PO ($\rho = -0.87$) indica que los incrementos en la densidad aparente estuvieron asociados con una reducción de la porosidad total. Asimismo, la relación positiva entre Da y Dr ($\rho = 0.72$) evidencia una asociación directa entre ambas propiedades de densidad.

Entre las fracciones texturales, la arena presentó relaciones negativas con el limo ($\rho = -0.86$) y la arcilla ($\rho = -0.61$), mientras que el limo se relacionó negativamente con Da ($\rho = -0.75$) y positivamente con PO ($\rho = 0.62$). Además, la arena mostró una relación positiva con Da y negativa con PO, evidenciando que la variación textural estuvo asociada con cambios en la densidad y el espacio poroso del suelo.

La relación entre CE y MO presentaron coeficientes de menor magnitud, indicando una menor asociación con las demás propiedades evaluadas. Los resultados muestran que las relaciones más marcadas se concentraron en el sistema textura–densidad–porosidad, lo cual resulta relevante para interpretar el comportamiento físico del suelo y la posterior selección de variables para las funciones de pedotransferencia.

5.4.8. Análisis de correlación entre el contenido de humedad y las propiedades físicas del suelo

En la Figura 21 se observan los resultados del análisis de correlación de Spearman para determinar la relación entre el contenido de humedad del suelo y sus propiedades físicas a diferentes tensiones evaluadas. El análisis se realizó para el conjunto de las muestras ($n = 24$), y posteriormente de manera independiente para las profundidades de 0–20 cm y 20–40 cm ($n = 12$ por profundidad) (Figura 18 y Figura 19). Esta separación permitió determinar si la asociación entre las propiedades físicas y la retención de humedad se mantenía o cambiaba con la profundidad.

Para el conjunto de las muestras, la arena (A) presentó correlaciones negativas y estadísticamente significativas con el contenido de humedad desde 10 hasta 3000 hPa, con valores de ρ que variaron de -0.632 a -0.418 . La relación fue más intensa a 10 hPa ($\rho = -0.632$; $p = 0.0009$) y disminuyó progresivamente hacia tensiones mayores. A partir de 5000 hPa, la asociación dejó de ser significativa. El limo (L) mostró el comportamiento contrario, con correlaciones positivas significativas desde 10 hasta 800 hPa, con valores entre $\rho = 0.627$ y 0.422 . La mayor asociación se presentó a 10 hPa ($\rho = 0.627$; $p = 0.0010$), mientras que a partir de 1000 hPa la relación dejó de ser estadísticamente significativa.

La arcilla (R) presentó una asociación positiva significativa únicamente a 10 hPa ($\rho = 0.409$; $p = 0.0474$). La materia orgánica (MO), densidad real (Dr), porosidad total (PO) y conductividad eléctrica (CE) no mostraron correlaciones estadísticamente significativas con el contenido de humedad en el conjunto completo de tensiones. La densidad aparente (DA) presentó correlaciones negativas significativas desde 10 hasta 80 hPa, con valores de $\rho = -0.631$ a -0.437 . La relación más fuerte se registró a 10 hPa ($\rho = -0.631$; $p = 0.0009$). A partir de 100 hPa, las correlaciones con DA dejaron de ser estadísticamente significativas.

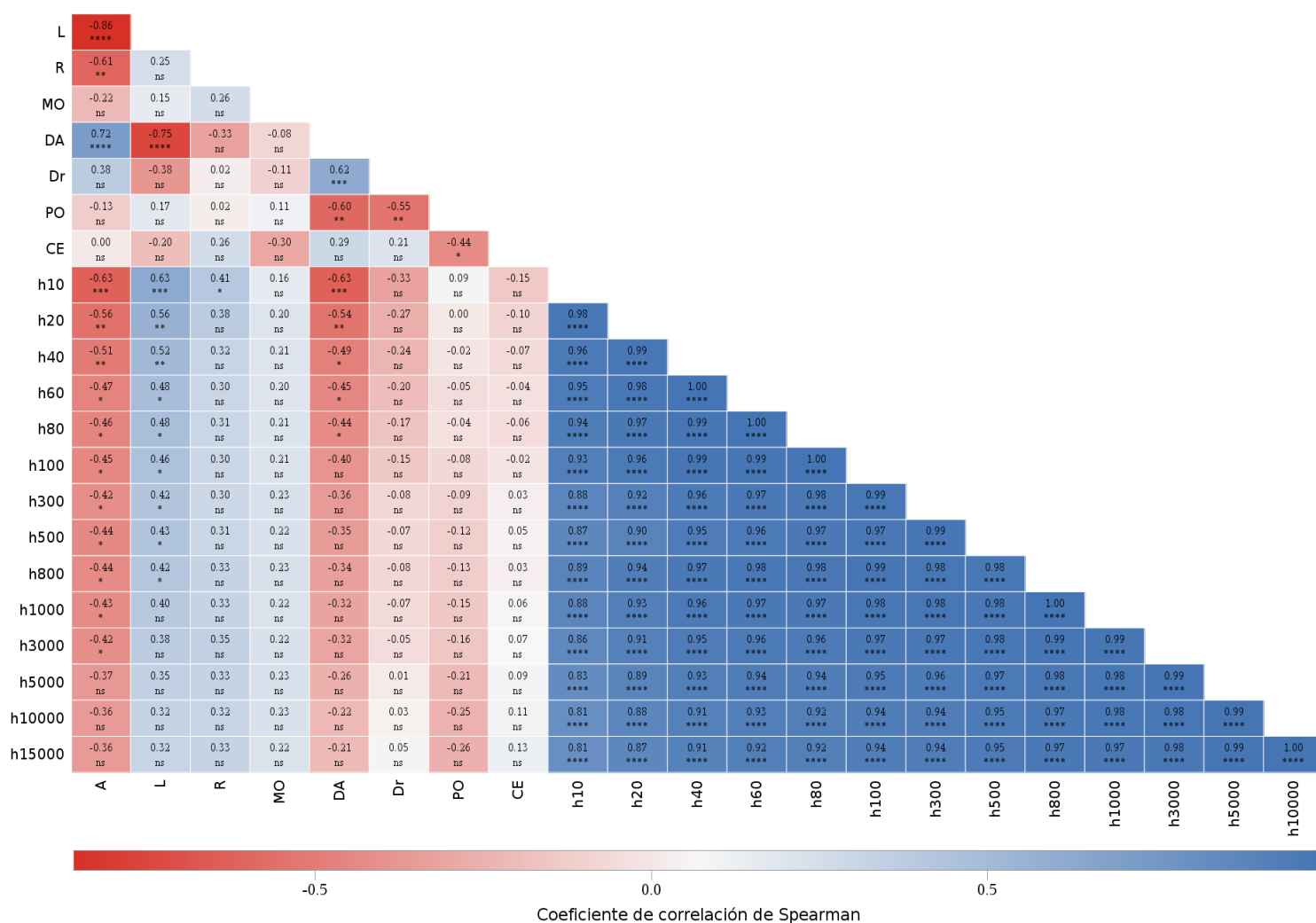


Figura 21. Matriz general de correlación de Spearman entre las propiedades físicas y el contenido de humedad a diferentes tensiones matriciales.

Nota: A = Arena; L = Limo; R = Arcilla; CE = Conductividad eléctrica; DA = Densidad aparente; DR = Densidad real; MO = Materia orgánica; PO = Porosidad total, h = Hectopascales.

Los valores corresponden a los coeficientes de correlación de Spearman (ρ). Los valores positivos indican una relación directa y los negativos una relación inversa entre las variables.

Fuente: Elaboración propia

El patrón general indica que la textura y la densidad aparente tuvieron una influencia más evidente sobre la retención de agua durante el tramo inicial del drenaje. La relación negativa entre arena y humedad refleja que una mayor proporción de partículas gruesas favorece una la presencia de poros de mayor tamaño, desde los cuales el agua se libera con mayor facilidad a valores de potencial matricial cercanos a cero. al disminuir el potencial matricial.

Al contrario, la relación positiva del limo con el contenido de humedad indica una mayor capacidad de retención en este intervalo, debido a la mayor participación de poros de menor diámetro asociados a las fracciones finas. La débil y puntual relación de la arcilla muestra que su efecto no fue uniforme a través de toda la curva, lo cual indica que la cantidad de arcilla por sí sola no explica completamente la retención de agua.

La correlación negativa observada entre la densidad aparente y el contenido de humedad a bajas tensiones también refleja la importancia de la condición física del suelo durante el drenaje inicial. Los resultados indican que las relaciones entre las propiedades físicas y la humedad no fueron constantes en todas las tensiones, sino que cambiaron conforme aumentó la energía necesaria para extraer el agua retenida en el suelo.

5.4.9. Desarrollo de las funciones de pedotransferencia (FPT)

En esta etapa se desarrollaron funciones de pedotransferencia (FPT) a partir de las propiedades físicas del suelo y los parámetros obtenidos de las curvas de retención de humedad, con el propósito de establecer relaciones que permitieran estimar las propiedades hidráulicas del suelo.

a. Regresión lineal múltiple para el desarrollo de las funciones de pedotransferencia

La Tabla 21 demuestra el desarrollo de las funciones de pedotransferencia realizado mediante regresión lineal múltiple, evaluando seis modelos bibliográficos: Rawls y Brakensiek (1985), Delgado y Barreto (1988), Pecorari (1988), Malavé (1991), Peralta y Barrios (2006) y Chicas et al. (2014), para las diferentes tensiones de las curvas de retención de humedad.

Tabla 21. Resumen del desempeño de los seis modelos bibliográficos de pedotransferencia evaluados a diferentes tensiones.

Modelo	Tensiones evaluadas (hPa)	Nº veces en primer lugar	Rango de R^2 ajustado	Rango de RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Rango de MAE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
Rawls y Brakensiek (1985)	14	0	0.045–0.363	4.833–5.763	4.061–4.894
Delgado y Barreto (1988)	14	0	0.045–0.363	4.833–5.763	4.061–4.894
Pecorari (1988)	14	0	0.067–0.365	4.946–5.915	4.094–5.127
Malavé (1991)	14	13	0.091–0.371	4.921–5.765	4.026–4.901
Peralta y Barrios (2006)	14	0	0.012–0.429	4.458–5.756	3.550–4.890
Chicas et al. (2014)	14	1	0.033–0.450	4.601–6.041	3.657–5.252

Nota: R^2 ajustado: coeficiente de determinación ajustado; RMSE: raíz del error cuadrático medio; MAE: error absoluto medio; Nº veces en primer lugar: número de tensiones en las que el modelo obtuvo el mejor desempeño.

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 21 muestra que Malavé (1991) presentó el mejor desempeño en 13 de las 14 tensiones evaluadas, con valores de R^2 ajustado entre 0.091 y 0.371, RMSE entre 4.921 y 5.765 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y MAE entre 4.026 y 4.901 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Chicas et al. (2014) obtuvo el primer lugar a 10 hPa, donde alcanzó el mayor R^2 ajustado (0.450) y los menores valores de RMSE (4.601 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y MAE (3.657 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Estos resultados muestran que el desempeño de los modelos varió según las tensiones (hPa), por lo que un mismo modelo no mantuvo la misma precisión en todo el intervalo evaluado.

Los resultados difieren de Bejar et al. (2020), quienes encontraron un mejor desempeño de Rawls y Brakensiek (1985) en un Andosol, mientras que Malavé (1991) presentó menor precisión. En el presente estudio, Malavé (1991) mostró el mejor desempeño general, evidenciando que la precisión de las funciones de pedotransferencia depende de las características del suelo y de las relaciones entre las variables utilizadas.

La Tabla 22 presenta las ecuaciones finales correspondientes a los modelos con mejor desempeño para estimar el contenido de humedad del suelo a diferentes tensiones. La selección del mejor modelo para cada tensión se basó en los valores de R^2 ajustado, RMSE, MAE y en el número de veces que cada modelo ocupó el primer lugar.

Tabla 22. Ecuaciones de regresión correspondientes a los modelos con mejor desempeño para estimar el contenido de humedad del suelo a diferentes tensiones.

Tensión (hPa)	Modelo	Funciones
10	Chicas et al., 2014	$\theta = 48.29834 - 15.87741 \times DA + 0.63891 \times R$
20	Malavé, 1991	$\theta = 67.99259 - 0.52242 \times A + 1.66948 \times MO$
40	Malavé, 1991	$\theta = 64.44520 - 0.48422 \times A + 1.73699 \times MO$
60	Malavé, 1991	$\theta = 63.76372 - 0.48164 \times A + 1.71594 \times MO$
80	Malavé, 1991	$\theta = 63.24272 - 0.47913 \times A + 1.72135 \times MO$
100	Malavé, 1991	$\theta = 61.62158 - 0.46586 \times A + 1.70388 \times MO$
300	Malavé, 1991	$\theta = 57.43745 - 0.43225 \times A + 1.64040 \times MO$
500	Malavé, 1991	$\theta = 56.44011 - 0.42882 \times A + 1.54373 \times MO$
800	Malavé, 1991	$\theta = 53.93621 - 0.41551 \times A + 1.60798 \times MO$
1000	Malavé, 1991	$\theta = 52.15425 - 0.40289 \times A + 1.51501 \times MO$
3000	Malavé, 1991	$\theta = 47.02092 - 0.37509 \times A + 1.74777 \times MO$
5000	Malavé, 1991	$\theta = 43.70660 - 0.34651 \times A + 1.44586 \times MO$
10000	Malavé, 1991	$\theta = 41.30178 - 0.32343 \times A + 1.23677 \times MO$
15000	Malavé, 1991	$\theta = 39.56732 - 0.30896 \times A + 1.20756 \times MO$

Nota: θ = contenido de humedad volumétrico (%), DA = densidad aparente (g cm^{-3}), R = arcilla, A = arena y MO = materia orgánica.

Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran diferencias en las variables utilizadas para estimar el contenido de humedad según la tensión evaluada. A 10 hPa, la ecuación correspondiente, al modelo de Chicas

et al. (2014), incorporo la densidad aparente y el contenido de arcilla como variables predictoras. En cambio, desde 20 hasta 15000 hPa, las ecuaciones seleccionadas correspondieron al modelo de Malavé (1991), el cual utilizó la proporción de arena y el contenido de materia orgánica.

La repetida selección de estas variables indica que las propiedades físicas relacionadas con la textura y la materia orgánica fueron las principales variables empleadas por los modelos bibliográficos para estimar el contenido de humedad en las diferentes tensiones. La variación de los coeficientes de arena y materia orgánica entre las ecuaciones refleja que su contribución a la estimación del contenido de humedad cambia a lo largo de la curva de retención.

Figura 22 presenta la comparación entre los contenidos de humedad observados experimentalmente y los estimados mediante las funciones de pedotransferencia evaluadas para la finca Los Llanos, utilizando la línea 1:1 como referencia para visualizar la concordancia entre ambos valores.

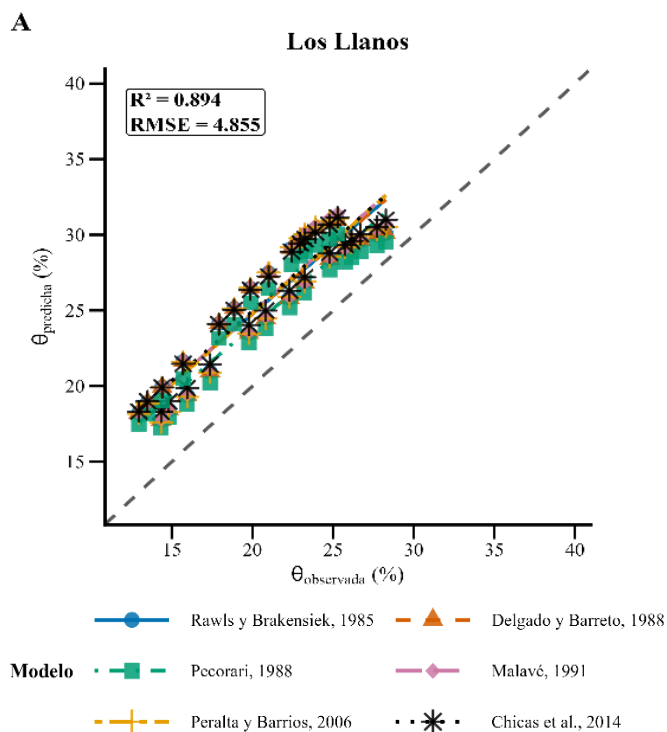


Figura 22. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Los Llanos.

Fuente: Elaboración propia

En Los Llanos, los valores estimados mostraron una buena predicción con los observados, reflejada en un R^2 de 0.894. Sin embargo, el RMSE de 4.855 % evidencia desviaciones puntuales respecto a la línea 1:1. Esto indica que las funciones de pedotransferencia desarrollaron adecuadamente la tendencia general del contenido de humedad, aunque su precisión varió dentro del rango evaluado. Este comportamiento coincide con lo señalado por Wösten *et al.* (2001), quienes indican que el desempeño de estas funciones depende de las características particulares del suelo y de las variables empleadas para realizar la estimación.

En la Figura 23, los valores estimados para Palo Verde se concentraron alrededor de la relación observada–estimada, con un R^2 de 0.925 y un RMSE de 4.864 %.

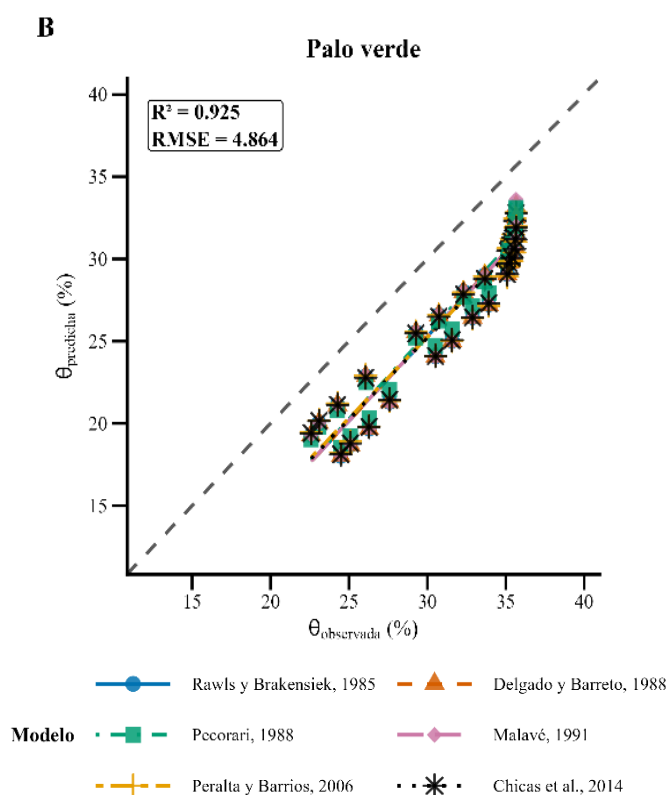


Figura 23. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Palo Verde.

Fuente: Elaboración propia

En Palo Verde, los valores estimados presentaron una alta correspondencia con los observados, con un R^2 de 0.925, aunque el RMSE de 4.864 % evidencia desviaciones en algunas estimaciones. La dispersión respecto a la línea 1:1 indica que el ajuste no fue uniforme en todo el rango de humedad. Børgesen y Schaap (2005) también señalaron que la incertidumbre de las funciones de pedotransferencia puede variar según las propiedades utilizadas como predictoras y el contenido de arcilla del suelo. El comportamiento observado en Palo Verde refleja que las funciones bibliográficas representaron adecuadamente la tendencia general, pero con diferencias asociadas a las condiciones particulares de los suelos evaluados.

En siguiente Figura 24 se observa el comportamiento de las funciones de pedotransferencia para estimar los valores observados y estimados para la finca Santa Paula.

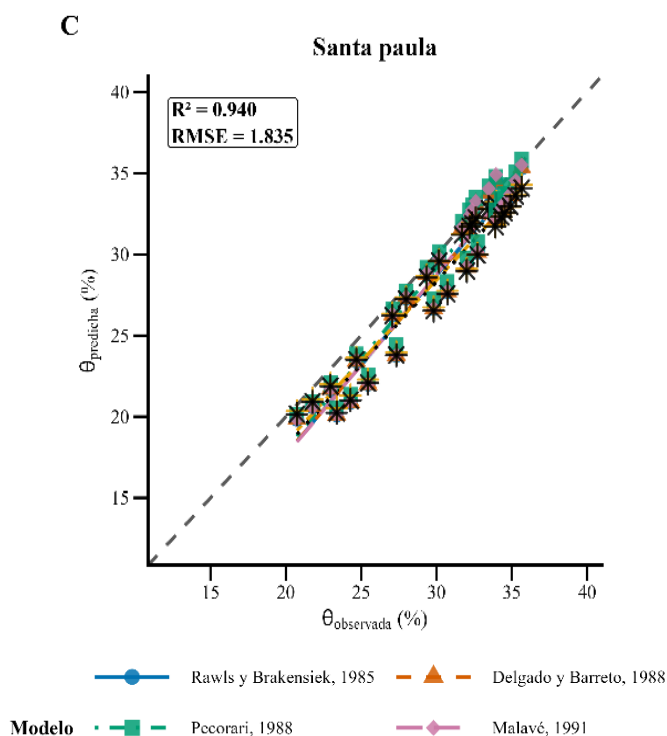


Figura 24. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Santa Paula.

Fuente: Elaboración propia

Santa Paula presentó la mayor concordancia entre los valores observados y estimados, con un R^2 de 0.940 y un RMSE de 1.835 %. La cercanía de los puntos a la línea 1:1 indica una menor dispersión de las estimaciones y un ajuste más preciso en comparación con las fincas analizadas previamente. Este resultado se encuentra dentro de un desempeño favorable reportado para funciones de pedotransferencia; Kværnø y Haugen (2011) obtuvieron RMSE entre 4.4 y 6.8 % al evaluar diferentes funciones para estimar la retención de agua. Asimismo, Børgesen y Schaap (2005) señalaron que la incorporación de propiedades como textura, densidad aparente y materia orgánica puede mejorar la capacidad predictiva de estas funciones.

La Figura 25 corresponde a los valores observados y estimados mediante las funciones de pedotransferencia para la finca Tronadora 1.

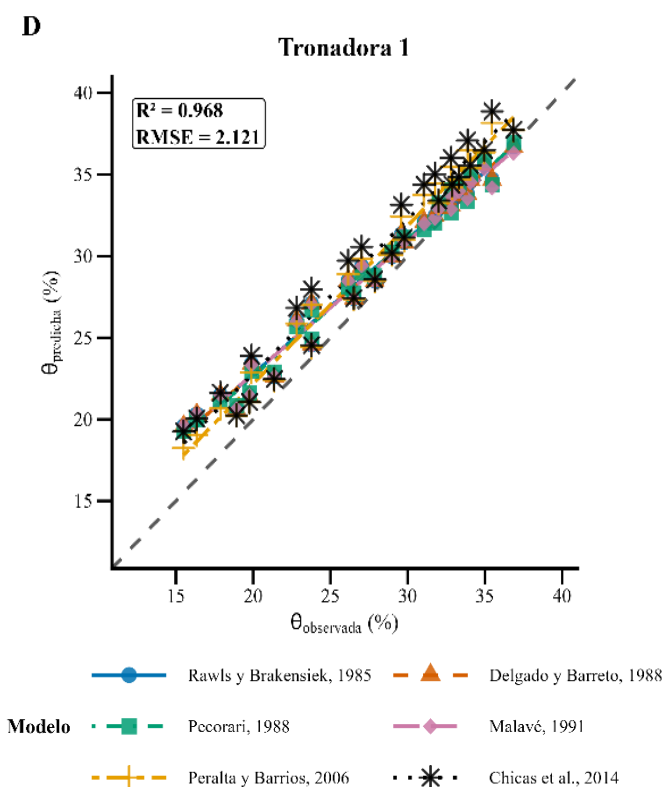


Figura 25. . Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Tronadora 1.

Fuente: Elaboración propia

Tronadora 1 presentó una alta correspondencia entre los valores observados y estimados, con un R^2 de 0.968 y un RMSE de 2.121 %, reflejando una baja dispersión respecto a la línea 1:1. Este comportamiento indica que las funciones reprodujeron con buena precisión la variación del contenido de humedad en esta finca. Resultados similares fueron señalados por Minasny y McBratney (2002), quienes destacaron que la precisión de las funciones de pedotransferencia depende de la información de entrada y de la incertidumbre asociada a las variables utilizadas para realizar las estimaciones.

La Figura 26 muestra los valores observados y estimados por las funciones de pedotransferencia para la finca Tronadora 2 S1.

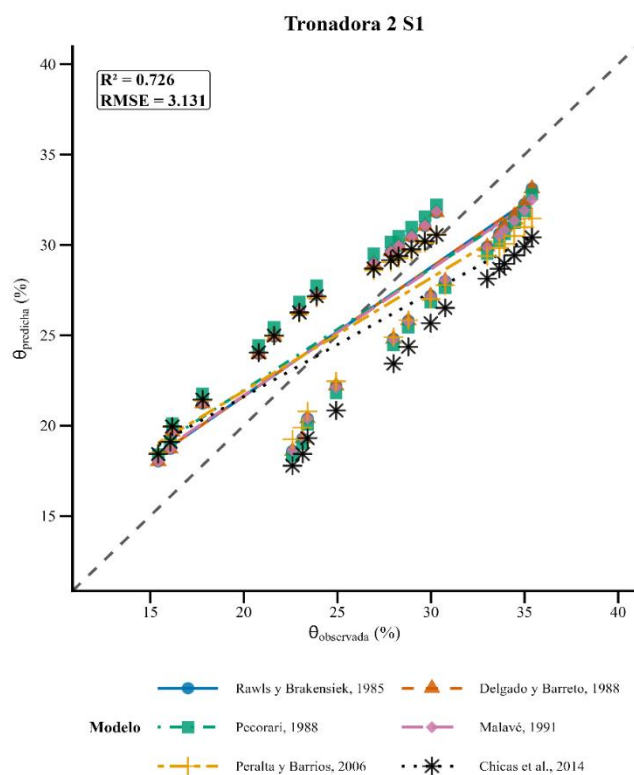


Figura 26. Comparación entre los contenidos de humedad observados y estimados mediante funciones de pedotransferencia en la finca Tronadora 2 S1

Fuente: Elaboración propia

Tronadora 2 S1 presentó el menor ajuste, con un R^2 de 0.726 y un RMSE de 3.131 %. La mayor dispersión respecto a la línea 1:1 puede relacionarse con la incertidumbre asociada a las

variables de entrada utilizadas por las funciones. En el análisis de correlación, DA–MO ($\rho = -0.085$) y PO–MO ($\rho = 0.097$) mostraron asociaciones débiles, reflejando una baja relación entre estas variables. Van Looy *et al.* (2017) señalan que el aporte de la textura, densidad aparente y materia orgánica a la estimación de propiedades hidráulicas puede variar según las características del suelo.

5.4.10. Modelación propia de Funciones de Pedotransferencia

En esta etapa se desarrollaron modelos propios de funciones de pedotransferencia (FPT) a partir de las propiedades físicas del suelo y los parámetros hidráulicos obtenidos, con el propósito de estimar la de retención de humedad y evaluar su capacidad predictiva en las fincas estudiadas.

a. Selección de variables y modelos mediante GLMSELECT

Para el desarrollo de las funciones de pedotransferencia propias se utilizó el procedimiento GLMSELECT, mediante modelos de regresión lineal múltiple (Tabla 23). Se evaluaron las propiedades físicas del suelo como variables predictoras del contenido de humedad para cada una de las 14 tensiones matriciales. La selección de variables permitió identificar las propiedades con mayor aporte al modelo en cada tensión y reducir la incorporación de variables que no contribuyeron significativamente a la estimación.

Tabla 23. Comparación de los modelos Stepwise y Backward seleccionados mediante GLMSELECT para las diferentes tensiones

Tensión (hPa)	Modelo	Variables seleccionadas	RMSE	CV PRESS
10	Stepwise	A, DA	4.763	647.630
	Backward	MO, DA, PO, CE	4.493	493.917
20	Stepwise	A	5.352	720.990
	Backward	MO, DA, PO, CE	4.830	594.411
40	Stepwise	A	5.602	806.456
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.116	655.611
60	Stepwise	A	5.680	821.156
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.263	679.945
80	Stepwise	A	5.706	825.336
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.321	687.946
100	Stepwise	A	5.860	870.646
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.521	726.748
300	Stepwise	A	5.945	899.101
	Backward	MO, DA, Dr, PO, CE	5.595	734.344
500	Stepwise	A	5.879	877.660
	Backward	MO, DA, Dr, PO, CE	5.543	719.268
800	Stepwise	A	5.932	889.585
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.637	743.622
1000	Stepwise	A	5.885	879.154
	Backward	MO, DA, PO, CE	5.590	734.672
3000	Stepwise	A	5.896	872.161
	Backward	MO, DA, Dr, PO, CE	5.586	721.164
5000	Stepwise	R	5.684	786.102
	Backward	A, MO, DA, Dr, PO, CE	5.476	668.455
10000	Stepwise	R	5.595	758.359
	Backward	A, MO, DA, Dr, PO, CE	5.379	657.891
15000	Stepwise	R	5.544	742.827
	Backward	A, MO, DA, Dr, PO, CE	5.355	660.197

Nota: A = arena; R = arcilla; MO = materia orgánica; DA = densidad aparente; Dr = densidad real; PO = porosidad total; CE = conductividad eléctrica.

Fuente: elaboración propia.

La comparación de los procedimientos de selección mostró que Backward presentó menores valores de RMSE ajustado y CVPRESS que Stepwise en las 14 tensiones evaluadas. La diferencia fue consistente en todo el intervalo de tensiones, con una reducción del error tanto en el ajuste como en la validación cruzada. Por este comportamiento, se seleccionaron los modelos

obtenidos mediante Backward como base para la construcción de las funciones de pedotransferencia propias.

b. Desarrollo de ecuaciones propias de pedotransferencia

En la Tabla 24 se observan las funciones de pedotransferencia propias realizadas a partir de la selección realizada mediante GLMSELECT, utilizando los modelos obtenidos mediante el procedimiento Backward. Las ecuaciones se desarrollaron para cada una de las 14 tensiones matriciales evaluadas, utilizando como variables predictoras las propiedades físicas seleccionadas en cada modelo. La estructura de las funciones varió según la tensión, debido a las diferencias en las variables incorporadas en cada modelo.

Tabla 24. Funciones de pedotransferencia propias seleccionadas mediante el procedimiento Backward para las diferentes tensiones.

Tensión (hPa)	Variables predictoras	Función de pedotransferencia
10	MO, DA, PO, CE	$\theta = 96.963 + 1.818\text{MO} - 31.874\text{DA} - 0.530\text{PO} + 19.237\text{CE}$
20	MO, DA, PO, CE	$\theta = 93.053 + 2.324\text{MO} - 29.804\text{DA} - 0.560\text{PO} + 21.932\text{CE}$
40	MO, DA, PO, CE	$\theta = 89.544 + 2.429\text{MO} - 28.454\text{DA} - 0.552\text{PO} + 24.980\text{CE}$
60	MO, DA, PO, CE	$\theta = 88.876 + 2.484\text{MO} - 27.946\text{DA} - 0.573\text{PO} + 25.545\text{CE}$
80	MO, DA, PO, CE	$\theta = 88.609 + 2.537\text{MO} - 27.593\text{DA} - 0.591\text{PO} + 25.295\text{CE}$
100	MO, DA, PO, CE	$\theta = 87.239 + 2.602\text{MO} - 26.763\text{DA} - 0.613\text{PO} + 26.371\text{CE}$
300	MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 63.363 + 2.472\text{MO} - 30.947\text{DA} + 11.828\text{Dr} - 0.639\text{PO} + 34.075\text{CE}$
500	MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 64.254 + 2.388\text{MO} - 30.909\text{DA} + 11.255\text{Dr} - 0.646\text{PO} + 33.506\text{CE}$
800	MO, DA, PO, CE	$\theta = 81.271 + 2.625\text{MO} - 24.742\text{DA} - 0.649\text{PO} + 26.236\text{CE}$
1000	MO, DA, PO, CE	$\theta = 79.871 + 2.549\text{MO} - 24.374\text{DA} - 0.650\text{PO} + 26.135\text{CE}$
3000	MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 58.959 + 2.691\text{MO} - 28.103\text{DA} + 9.445\text{Dr} - 0.655\text{PO} + 34.075\text{CE}$
5000	A, MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 45.460 + 0.359\text{A} + 2.960\text{MO} - 44.290\text{DA} + 17.953\text{Dr} - 0.966\text{PO} + 41.756\text{CE}$
10000	A, MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 42.370 + 0.375\text{A} + 2.799\text{MO} - 43.976\text{DA} + 18.571\text{Dr} - 0.987\text{PO} + 41.242\text{CE}$
15000	A, MO, DA, Dr, PO, CE	$\theta = 41.588 + 0.356\text{A} + 2.751\text{MO} - 42.202\text{DA} + 17.597\text{Dr} - 0.957\text{PO} + 41.342\text{CE}$

Nota: θ = contenido de humedad volumétrica (%); A = arena; MO = materia orgánica; DA = densidad aparente; Dr = densidad real; PO = porosidad total; CE = conductividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de pedotransferencia obtenidas mediante el procedimiento Backward presentaron diferencias en las variables predictoras seleccionadas según la tensión matricial. La materia orgánica, densidad aparente, porosidad total y conductividad eléctrica estuvieron presentes en la mayoría de las ecuaciones. La densidad real se incorporó a 300, 500 y 3000 hPa, mientras que la arena fue seleccionada en las tensiones de 5000, 10000 y 15000 hPa. Estos resultados indican que la combinación de propiedades físicas asociadas con la estimación del contenido de humedad varió en función de la tensión evaluada.

5.4.11. Validación de las Funciones de Pedotransferencia

En esta etapa se evaluó el desempeño de las funciones de pedotransferencia desarrolladas, mediante la comparación entre los valores observados y los valores estimados por los modelos, utilizando indicadores estadísticos para determinar su precisión y capacidad predictiva.

a. Modelos de pedotransferencia bibliográficos

La comparación visual del RMSE de los seis modelos evaluados (Figura 27) confirma la superioridad del modelo de Malavé (1991) para la mayoría de las tensiones, así como el mejor desempeño del modelo de Chicas et al. (2014) exclusivamente en la tensión de 10 hPa. El modelo de Rawls y Brakensiek (1985) mostró los mayores errores en todas las tensiones, con RMSE que alcanzaron $6.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en las tensiones más altas.

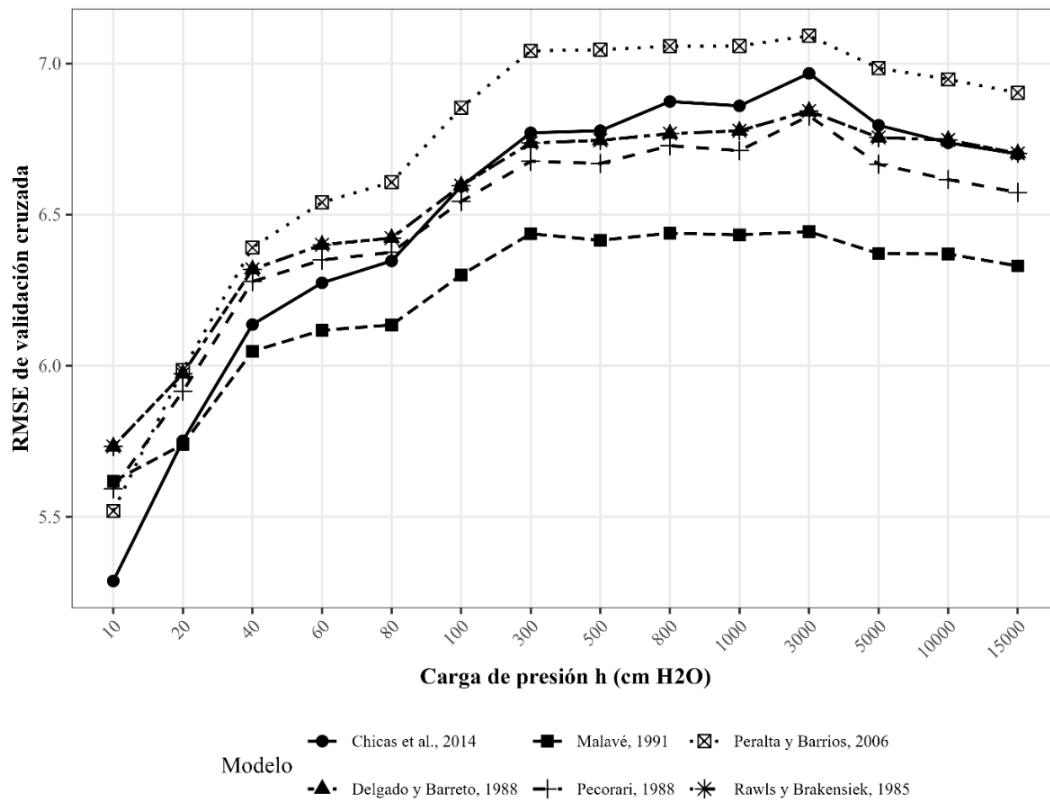


Figura 27. Comparación del RMSE de los diferentes modelos de pedotransferencia evaluados para cada tensión (hPa)

Fuente: Elaboración propia

El modelo de Malavé (1991) mostró mejor desempeño que Rawls y Brakensiek (1985), especialmente en los suelos Franco Arenosos con bajo contenido de materia orgánica evaluados. Esta diferencia puede relacionarse con que Rawls y Brakensiek fue desarrollado principalmente para suelos de textura más fina y con mayor variabilidad en el contenido de materia orgánica, por lo que su aplicación en los suelos estudiados resultó menos eficiente. Esto coincide con García Coronado (2011), quien también reportó una subestimación de la capacidad de retención en suelos arenosos. Además, Malavé presentó mayor robustez entre 20 y 15,000 hPa, resultando más adecuado para estimar la curva de retención de humedad más allá de la CC y PMP.

En la Tabla 25 se representa la comparación entre los valores de humedad estimados por las FPT y los observados experimentalmente permitió evaluar la precisión de los modelos seleccionados. Para la capacidad de campo, determinada a las tensiones reales de cada sitio (que variaron entre pF 0.69 y pF 2.56, según la Tabla 19 del presente estudio) el modelo de Malavé (1991) presentó un RMSE de $5.05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y un MAE de $4.24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, con un sesgo medio cercano a cero ($-0.02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), lo que indica una buena capacidad predictiva general sin subestimación o sobreestimación del modelo.

Tabla 25. Comparación entre valores de humedad estimados por FPT (mejor modelo bibliografico por tensión) y observados con ollas de presión Richards para diferentes tensiones (hPa).

Tensión (hPa)	n	θ observado ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ estimado ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	RMSE ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	MAE ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Sesgo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
10	24	33.62 ± 6.63	33.62 ± 5.08	4.60	3.66	-0.01
20	24	32.90 ± 6.66	32.90 ± 5.12	5.05	4.24	-0.02
40	24	32.24 ± 6.72	32.24 ± 5.15	5.29	4.44	-0.02
60	24	31.71 ± 6.77	31.71 ± 5.17	5.37	4.50	-0.02
80	24	31.38 ± 6.78	31.38 ± 5.15	5.39	4.51	-0.02
100	24	30.69 ± 6.86	30.69 ± 5.10	5.55	4.67	-0.03
300	24	28.84 ± 6.83	28.84 ± 5.10	5.68	4.84	-0.02
500	24	27.92 ± 6.79	27.92 ± 5.07	5.67	4.75	-0.02
800	24	26.50 ± 6.81	26.50 ± 5.03	5.73	4.85	-0.02
1000	24	25.47 ± 6.74	25.47 ± 4.96	5.72	4.83	-0.02
3000	24	22.75 ± 6.75	22.75 ± 4.90	5.76	4.90	-0.02
5000	24	21.00 ± 6.52	21.00 ± 4.81	5.69	4.80	-0.01
10000	24	19.92 ± 6.39	19.92 ± 4.71	5.66	4.75	-0.01
15000	24	19.18 ± 6.31	19.18 ± 4.66	5.63	4.71	-0.01

Nota: Los valores de θ observada y θ estimada corresponden al promedio de las 24 observaciones por tensión. La igualdad entre ambas medias no implica predicciones perfectas, las diferencias individuales se reflejan en el RMSE y MAE.

Fuente: Elaboración propia

La comparación entre los valores estimados por las FPT y los observados en laboratorio mostró una adecuada predicción de la retención de humedad en todo el rango de tensiones, con sesgos

prácticamente insignificantes. Los valores de RMSE fueron menores a bajas tensiones y aumentaron ligeramente en el rango intermedio, alcanzando $5,76 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a 3,000 hPa, lo que refleja la complejidad de las interacciones entre las propiedades del suelo, coincidiendo con lo reportado por López Rodríguez et al. (2016). En general, la precisión obtenida ($\text{RMSE} \approx 5\text{--}6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) es comparable con los resultados de Bejar Pulido *et al.* (2020) y resulta aceptable para fines de programación del riego.

b. Modelado de una función propia de pedotransferencia

Con el propósito de evaluar el desempeño de las funciones de pedotransferencia propias desarrolladas para las diferentes tensiones, los contenidos de humedad estimados mediante los modelos de regresión seleccionados se compararon con los valores observados experimentalmente en laboratorio. Para cada tensión se utilizaron los valores predichos generados directamente por el modelo final, identificados en los resultados de regresión como predicho, y los correspondientes valores observados de contenido de humedad.

En la Tabla 26 se observa el desempeño de las funciones evaluadas mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Estos indicadores permitieron cuantificar la magnitud de las diferencias entre los valores estimados por las funciones de pedotransferencia y los contenidos de humedad determinados experimentalmente.

El análisis de estos indicadores permite identificar cómo varía el desempeño de las funciones a lo largo de las diferentes tensiones evaluadas. Esto facilita reconocer las condiciones en las que las funciones presentan un comportamiento más consistente y aquellas en las que se incrementan los errores de estimación, aportando elementos para valorar su aplicabilidad en la caracterización de la humedad del suelo.

Tabla 26. Indicadores de desempeño de las funciones de pedotransferencia propias para las diferentes tensiones evaluadas.

Tensión (hPa)	n	RMSE (%)	MAE (%)
10	24	4.46	3.57
20	24	5.12	4.17
40	24	5.36	4.46
60	24	5.44	4.52
80	24	5.46	4.58
100	24	5.61	4.81
300	24	5.69	4.95
500	24	5.63	4.91
800	24	5.68	5.00
1000	24	5.63	4.90
3000	24	5.64	4.88
5000	24	5.44	4.64
10000	24	5.36	4.42
15000	24	5.31	4.36
General	336	5.43	4.58

Nota: n = Población; RMSE = raíz del error cuadrático medio; MAE = error absoluto medio.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el RMSE presentó valores comprendidos entre 4.46 y 5.69 %, evidenciando diferencias en el desempeño de las funciones según la tensión considerada. El menor valor se registró a 10 hPa, mientras que el mayor se obtuvo a 300 hPa. Por su parte, el MAE osciló entre 3.57 y 5.00 %, siguiendo un comportamiento similar al observado para el RMSE.

De forma general, los menores errores se presentaron en las tensiones más bajas, mientras que los valores aumentaron en las tensiones intermedias, particularmente entre 100 y 3000 hPa. Posteriormente, los indicadores mostraron una ligera disminución hacia las tensiones de 5000, 10000 y 15000 hPa.

Considerando conjuntamente las 336 observaciones correspondientes a las 14 tensiones, se obtuvo un RMSE general de 5.43 % y un MAE de 4.58 %. Estos resultados indican que las

funciones de pedotransferencia desarrolladas reprodujeron el contenido de humedad con diferencias variables entre las observaciones individuales y los valores experimentales.

Es importante señalar que estos indicadores fueron obtenidos a partir de las predicciones generadas por los modelos finales sobre el conjunto de datos analizado. Por tanto, representan el desempeño del ajuste de las funciones desarrolladas y permiten cuantificar la discrepancia entre los valores predichos y observados para cada tensión.

5.4.12. Relación estadística entre contenido de humedad estimados por FPT propias y datos experimentales de laboratorio

En la Figura 28 se muestra la comparación entre los valores de contenido de humedad observados y predichos mediante el modelo Backward para las fincas Los Llanos, Palo Verde, Santa Paula y Tronadora 1.

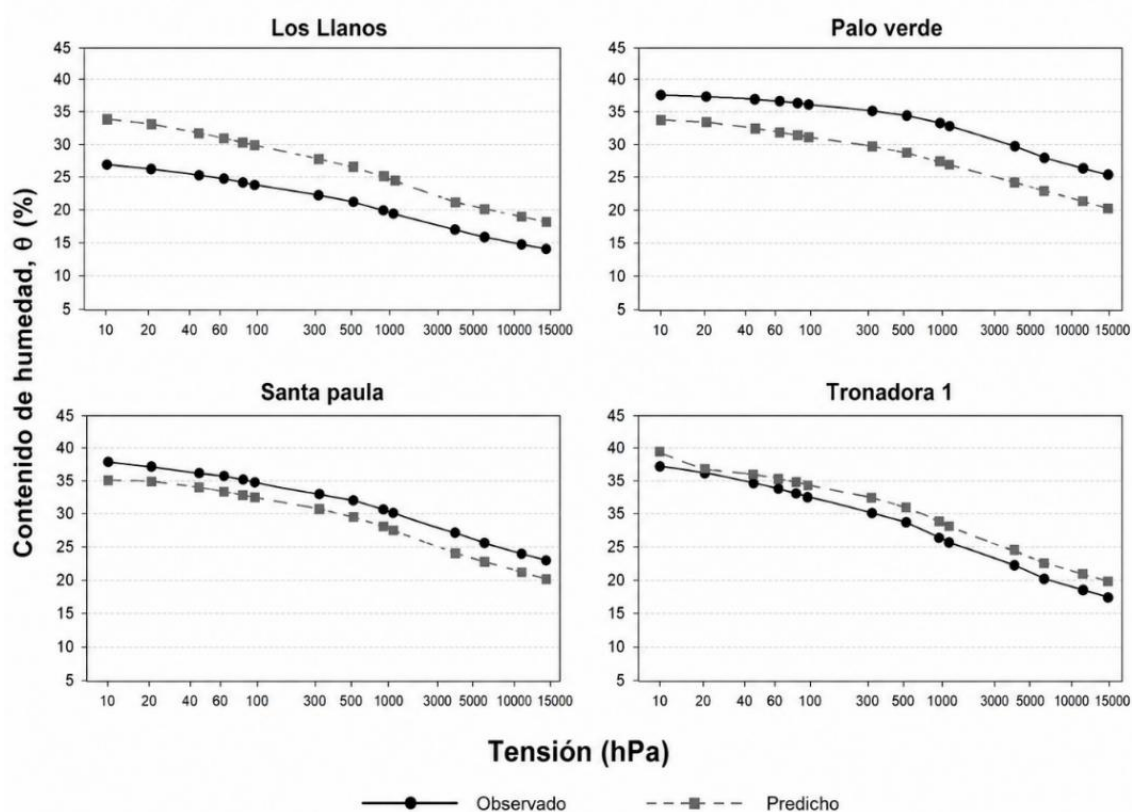


Figura 28. Comparación entre valores observados y predichos mediante el modelo Backward para las fincas Los Llanos, Palo Verde, Santa Paula y Tronadora 1.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el modelo predice una tendencia general en la disminución del contenido de humedad conforme aumentó la tensión matricial en las cuatro fincas. No obstante, la magnitud de las diferencias entre los valores observados y predichos varió entre fincas. La mayor separación entre ambas curvas se observó principalmente en Palo Verde y, en menor medida, en Santa Paula y Tronadora 1, mientras que Los Llanos presentó un comportamiento intermedio.

Las diferencias observadas evidencian que la capacidad predictiva de las FPT varió según las condiciones edáficas evaluadas. Este comportamiento puede atribuirse a la variabilidad de propiedades como la textura, densidad aparente y porosidad, que influyen en la retención de humedad. Esta variabilidad puede reducir la precisión de las estimaciones, principalmente a mayores tensiones, donde predominan los poros de menor tamaño.

En la siguiente Figura 29 se observó que para la finca tronadora 2 S1 hubo una mayor coincidencia entre los valores observados y predichos a lo largo de la mayoría de las tensiones evaluadas. Ambas curvas tuvieron un comportamiento similar, aunque se presentaron ligeras diferencias en las tensiones más elevadas.

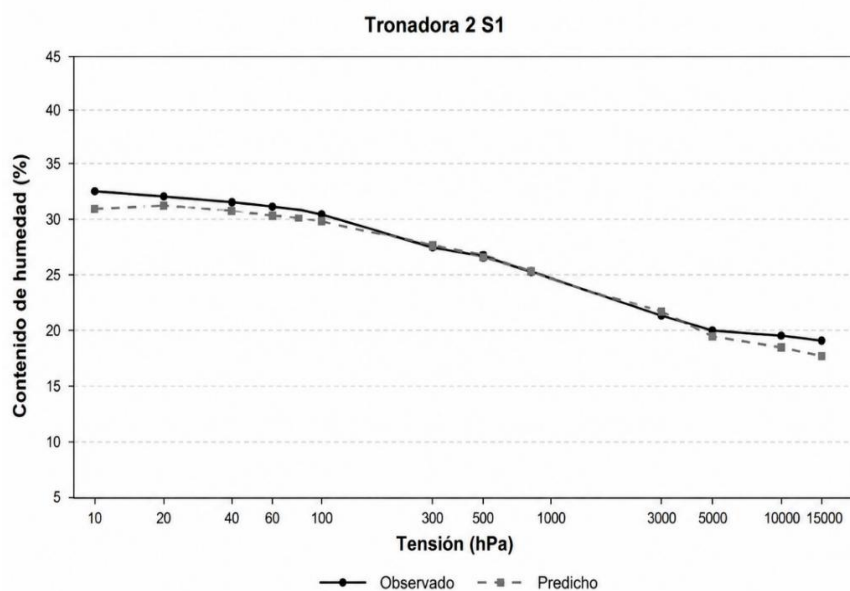


Figura 29. Comparación entre valores observados y predichos mediante el modelo Backward para la finca Tronadora 2 S1.

Fuente: Elaboración propia

La mayor proximidad entre ambas curvas sugiere que, bajo condiciones edáficas relativamente más homogéneas, las relaciones establecidas mediante el procedimiento Backward pueden representar con mayor precisión el comportamiento del contenido de humedad. Este resultado resalta que el desempeño de una FPT no depende únicamente de la estructura matemática del modelo, sino también de la capacidad de las variables predictoras para representar la variabilidad física que controla la retención de humedad en cada suelo.

La Figura 30 muestra ambas relaciones con el fin de evaluar el comportamiento general de las predicciones, así como cuantificar el grado de asociación y el error existente entre el contenido de humedad observado y predicho.

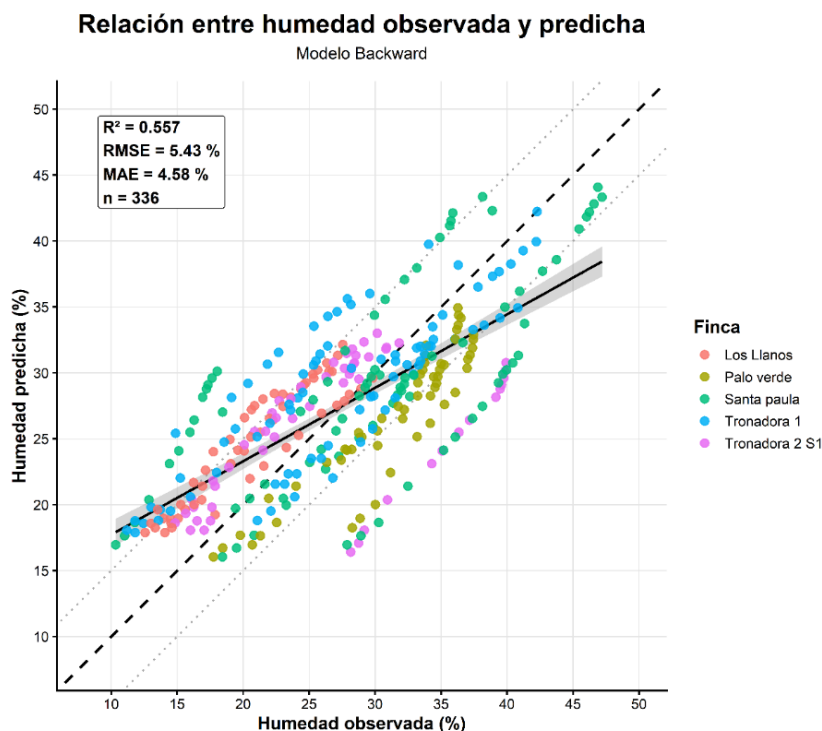


Figura 30. Relación general entre el contenido de humedad observado y el predicho mediante las funciones de pedotransferencia propias seleccionadas con el modelo Backward.

Fuente: Elaboración propia

Los valores predichos presentaron una relación positiva con los valores observados, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.657$, indicando que el modelo explicó el 65.7 % de la variabilidad del contenido de humedad experimental. Los indicadores de error fueron $RMSE = 5.43 \%$ y $MAE = 4.58 \%$, con un total de $n = 336$ observaciones. La dispersión de los puntos alrededor de la línea 1:1 evidencia que, aunque el modelo predijo la tendencia general de los datos, existieron diferencias entre las predicciones y los valores determinados experimentalmente.

Desde una perspectiva predictiva, el resultado indica un desempeño moderado de las funciones de pedotransferencia propias. La variabilidad observada alrededor de la línea de concordancia puede atribuirse a que la retención de agua es controlada simultáneamente por múltiples propiedades físicas del suelo y por su interacción, las cuales pueden diferir entre fincas y no ser completamente representadas por las variables incluidas en los modelos. La presencia de puntos alejados de la línea 1:1 confirma que la precisión de las estimaciones no fue homogénea en todas las condiciones evaluadas.

Los resultados demuestran que las FPT desarrolladas lograron captar una proporción importante de la variabilidad del contenido de humedad; sin embargo, los errores obtenidos indican que las predicciones deben interpretarse considerando la variabilidad edáfica entre fincas. Este comportamiento resalta la importancia de validar localmente las funciones de pedotransferencia, particularmente cuando se aplican a suelos con características físicas contrastantes, donde un mismo conjunto de variables predictoras puede presentar diferente capacidad para representar los procesos de retención de humedad.

VI. CONCLUSIONES

La caracterización de las propiedades físicas del suelo evidencio variabilidad espacial entre las fincas evaluadas, con predominio de la textura franco arenosa. Esta variabilidad es determinante para estimar de manera representativa el contenido de humedad del suelo.

Las curvas de humedad se ajustaron con el modelo de van Genuchten, con un $R^2 = 0.99$, dando lugar a la implementación de esta metodología en condiciones similares de suelo y manejo.

Las fincas presentaron diferentes tensiones en suelo para humedad a capacidad de campo, al igual que el contenido de humedad; efecto de la variabilidad de las condiciones y propiedades físicas de los suelos.

Las funciones de pedotransferencia estiman con baja precisión el contenido de humedad con un $RMSE = 5.05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ al integrar de forma general las condiciones y propiedades del suelo; por lo que es necesario realizar la caracterización de las propiedades físicas y su incidencia para que el suelo retenga humedad.

La relación estadística evidenció que la arcilla y la densidad aparente condicionan la retención de humedad del suelo, con valores de $p = 0.0467$ para la arcilla y $p = 0.0007$ para la densidad aparente. La densidad aparente presentó una mayor significancia estadística.

VII. RECOMENDACIONES

Generar los parámetros del modelo de van Genuchten obtenidos a partir de las curvas de retención de humedad para todas las fincas, con el propósito de mejorar la estimación del contenido de humedad y contribuir a una gestión del riego más eficiente y acorde con las condiciones específicas de cada suelo.

Realizar estudio sobre balance hídrico del suelo en las fincas de la compañía Azucarera Tres Valles, comparando la estimación del requerimiento de agua para riego con la metodología de tensiómetros y el modelo de van Genuchten con parámetros generados a partir de las curvas de humedad obtenidas en el laboratorio.

Utilizar las funciones de pedotransferencia propias desarrolladas mediante el procedimiento Backward y el modelo de Chicas et al. 2014, y Malavé 1991 para estimar el contenido de humedad del suelo a partir de sus propiedades físicas, con el propósito de facilitar la estimación de la humedad del suelo y contribuir a una gestión más eficiente de riego.

La capacidad de campo no debe establecerse mediante un único valor teórico para los suelos estudiados, debido a su variabilidad física; por ello, es necesario determinar experimentalmente la relación entre el contenido de humedad y el potencial matricial mediante pruebas de campo y laboratorio.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Arango, E. 2020. *Análisis de la humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca con sensores de radar de apertura sintética (SAR)* [en línea]. Tesis Ing. Agr. Palmira, Colombia, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Consultado 8 ene. 2026. Disponible en <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36768/earango.pdf?sequence>

Agostini, MA; Monterubbianesi, MG; Studdert, GA; Maurette, S. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente [en línea]. *Ciencia del Suelo* 32(2):171-176. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en: <https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v32n2/v32n2a03.pdf>

Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. 2006. *Necesidades de agua de los cultivos* [en línea]. In FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia. (Estudio FAO Riego y Drenaje, 56). p. 3. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.pdf>

Ángel Acosta, LM; Pineda Avellaneda, DG. 2019. *Medición de la conductividad hidráulica y curvas de retención de humedad en suelos parcialmente saturados utilizando metodologías modernas* [en línea]. Trabajo de Investigación (Ing. Civ.). Bogotá, Colombia, Universidad Católica de Colombia. Consultado 30 nov. 2025. Disponible en <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/15ee4b17-eebd-4dff-b48a-a04e31979710/content>

Assan, MM; Gorosito, SM. 2018. *Relación agua suelo planta (1). Serie Didáctica N°1 Cátedra de Riego y Drenaje. FCA UNCA*. San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina, Editorial de la Universidad Nacional de Catamarca. ISBN 978-987-661-308-8.

Ávila-Dávila, L; Soler-Méndez, M; Madrona-Sánchez, P; Ruiz-Canales, A; Bautista-Capetillo, CF; González-Trinidad, J; Molina-Martínez, JM. 2019. *Análisis de la velocidad*

de infiltración del agua en suelos saturados mediante lisímetros de pesada (en línea). In X Congreso Ibérico de Agroingeniería (2019, Huesca, España). Consultado 16 dic. 2024. Disponible en <https://zaguan.unizar.es/record/84426/files/3370.pdf>.

Bejar Pulido, SJ; Cantú Silva, I; Yáñez Díaz, MI; Luna Robles, EO. 2020. Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo [en línea]. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(59). Consultado 30 nov. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>

Beretta, AN; Silberman, AV; Paladino, L; Torres, D; Bassahun, D; Musselli, R; García-Lamohte, A. 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method [en línea]. *Ciencia e Investigación Agraria* 41(2):263-271. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>

Bouma, J. 2016. Hydropedology and the societal challenge of realizing the 2015 United Nations Sustainable Development Goals [en línea]. *Vadose Zone Journal* 15(9):vzj2016.09.0080. Consultado 12 dic. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.2136/vzj2016.09.0080>

Campos-Granados, MF; Méndez, JC. 2025. Relación entre metodologías de determinación de conductividad eléctrica y concentración de cationes solubles en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 49(1). <http://dx.doi.org/10.15517/vf5xpa16>

Chávez, JA; López, R; Landaverde, J; Mendoza, LE. 2015. *Uso de curva de retención suelo-agua y monitoreo en campo para caracterizar tefra parcialmente saturada en área metropolitana de San Salvador* [en línea]. San Salvador, El Salvador. Consultado 13 dic. 2025. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/280723166_Uso_de_Curva_de_Retencion_Suelo-Agua_y_Monitoreo_en_Campo_para_Caracterizar_Tefra_Parcialmente_Saturada_en_Area_Metropolitana_de_San_Salvador

Cely-reyes, G. E., & Moreno-perez, D. F. 2016. Determinación de las fracciones de carbono orgánico en el suelo del páramo La Cortadera, Boyacá. *Ingenio Magno*, 7(2), 139–149.

Corwin, DL; Yemoto, K. 2020. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids (en línea). Soil Science Society of America Journal 84(5):1442-1461. DOI: <http://doi.org/10.1002/SAJ2.20154>

Durman (Alias Group), Colombia. 2023. *Sistemas de riego: caña de azúcar* (en línea). Consultado 17 dic. 2024. Disponible en https://grupoalixaxis.s3.amazonaws.com/durman-colombia/descargas/flayer/Riego%20Ca%C3%B1a_Durman_2023.pdf

Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Eduardo Echeverría, H. 2014. Comparación De Métodos Para Determinar Carbono Orgánico En Suelo. Cienc Suelo (Argentina), 32(1), 13 19.

Enciso Vargas, F; Saldaña Quisca, M; Muñante Carrión, J; Arce Arteaga, B; Huamani Rodríguez, K. 2018. *Determinación de la curva de retención de humedad del suelo empleando la olla a presión Richards*. Informe de práctica, curso Fundamentos de Suelos y Plantas. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Facultad de Ingeniería Agrícola. 17 p. Consultado 15 feb. 2026. Disponible en <https://idoc.pub/documents/informe-olla-de-richards-vnd58gm5erlx>.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2009. *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050* [en línea]. Roma, Italia. Consultado 30 nov. 2025. Disponible en https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf

FAO. 2021b. Standard operating procedure for soil electrical conductivity, soil/water, 1:5. Rome, Italy, s.e.

Ferraz, GAS; Barbosa, BDS; Reynaldo, ÉF; Santos, SAd; Gonçalves, JRMR; Ferraz, PFP. 2019. *Spatial variability of soil pH sampled by two methodologies used in precision agriculture in farms under crop rotation* [en línea]. DYNA 86(209):289-297. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/496/49662418034/49662418034.pdf>

Figuerola, LR; Romero, ER; Fadda, GS. 2018. *Manual del cañero* [en línea]. Tucumán, Argentina, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Consultado 23 nov. 2025. Disponible en https://agrodigital.producciontucuman.gob.ar/uploads/documentos/manual_caniero_EEAOC.pdf

Fresneda, CA. 2019. *Elaboración de la curva de retención de agua de algunos suelos a partir de propiedades índice*. Tesis. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. Consultado 15 feb. 2026. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75639>.

Flores Delgadillo, L; Alcalá Martínez, JR. 2010. *Manual de procedimientos analíticos: Laboratorio de Física de Suelos* [en línea]. Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de floresgía, Departamento de Edafología. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

García Coronado, J. 2011. *Las curvas de retenciproón de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque* [en línea]. Tesis Dr. Cs. Agr. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. 61 p. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en https://repositorio.geotech.cu/xmlui/bitstream/handle/1234/3473/curvas%20de%20retenci%20de%20humedad%20y%20su%20estimaci%20mediante%20pedotransferencia_p.1-61.pdf

García, M; López, R; Fernández, A. 2018. Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta (en línea). ResearchGate. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/322888562_Conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua-suelo-planta.

Hidalgo-Campos, C; Camacho-Umaña, ME. 2024. Potencial hídrico y contenido del agua en el suelo: métodos de análisis disponibles y sus implicaciones en el manejo de los recursos suelo y agua [en línea]. *Agronomía Costarricense* 48(2):169-200. Consultado 23 nov. 2025. Disponible en https://www.mag.go.cr/rev_agr/V48n2-12.pdf

ISO (Organización Internacional de Normalización, Suiza). 2019. *Calidad del suelo. Determinación de la característica de la retención de agua. Métodos de laboratorio* [en línea]. Norma ISO 11274:2019. 2 ed. Ginebra, Suiza. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/68256/a830bfd4596e42f79355906b1b858f95/ISO-11274-2019.pdf>

Klute A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Number 9 parte 1 Physical and Mineralogical Methods Second Edition.* Madison, Wisconsin. Pag.404-408

López Rodríguez, J. A., Casanova Pinto, M., & Seguel Seguel, Ó. 2016. *Funciones de pedotransferencia para estimar la densidad aparente de suelos en Chile* [en línea]. Tesis (magíster en manejo de suelos y aguas) --Universidad de Chile. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991002719059703936/56UDC_INST:56UDC_INST

Mauricio Loarte, JJ. 2022. *Relación de la textura de los suelos agrícolas de la UNALM con los parámetros hídricos utilizando la olla de Richards* [en línea]. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e24dc9c8-df95-432b-8a26-2d03d07cf4da/content>

Meza Ochoa, VE. 2012. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria (en línea). *Boletín de Ciencias de la Tierra* (31):23-38. Consultado 16 dic. 2024. Disponible en <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=169524098003>.

Nath, T. N. (2014). Soil texture and total organic matter content and its influences on soil water holding capacity of some selected tea growing soils in Sivasagar district of Assam ... International Journal of Chemical Sciences, <https://www.researchgate.net/profile/mohammed-fattah> 12(4), 1419–1429. [4/post/which_soil_texture_index_is_more_useful_in_evaluation_of_the_relationship_between_soil_texture_and_organic_matter/attachment/5e08f098cfe4a777d4ff2061/as%3a841514854912001%401577644184162/download/soil-texture-and-total-organic-matter-content-and-its-influences-on-soil-water-holding-capacity-of-some-selected-tea-gro.pdf](https://www.researchgate.net/publication/414854912001%401577644184162/download/soil-texture-and-total-organic-matter-content-and-its-influences-on-soil-water-holding-capacity-of-some-selected-tea-gro.pdf)

Osorio Cadavid, G. 2007. Manual: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM- en la Producción de Caña y Panela. Santiago de Chile, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 176 p. ISBN 978-92-5-305910-2. Consultado 8 mar. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/4/a1525s/a1525s00.pdf>.

Pascual España, B; Pascual Seva, N. 2020. *Riegos de gravedad y a presión* [en línea]. 4 ed. Valencia, España, Editorial Universitat Politècnica de València. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/86dc9d6b-5d68-46bd-a2f8-3028a0ac08a1/content>

Rios Morantes, FJ. 2023. *Caracterización de la capacidad de retención de agua de cinco lotes contrastantes en manejo en Zamorano* [en línea]. Tesis Ing. Agr. Tegucigalpa, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Consultado 9 dic. 2025. Disponible en <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/18964cd5-9107-457c-ac26-510caa4f2a0a/content>

Romano, N; Palladino, M. 2002. *Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes* [en línea]. *Journal of Hydrology* 265(1):56-75. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00094-X)

Romero Campos, M; Cid Lazo, G; González Robaina, F; López Seijas, T. 2020. *Curvas tensión humedad y función conductividad hidráulica en suelos pardos* [en línea]. *Revista Ingeniería Agrícola* 10(2):e04. Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586263256004>

Rojas, B. (2013). *Determinación de la densidad real y aparente del suelo* [en línea]. Disponible en <https://perezguarinos.wordpress.com/2012/05/29/densidad-real-y-densidad-aparente/>

Ruiz Dager, M; Carrillo de Cori, CE; Sosa, F; Aular, LM; Mora, R; Castillo, L; Ortega, B; Castillo, E; Ramírez, E; Rodríguez, J; León, M; Silva, C; Tovar, MR; Martínez, A; Reverón, AM; Gámez, F. 2018. *Comparación de métodos para analizar materia orgánica en materiales orgánicos* [en línea]. In XXII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo (jul. 2018, Maracay, Venezuela). Consultado 15 dic. 2025. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/327402988_COMPARACION_DE_METODOS_PARA_ANALIZAR_MATERIA_ORGANICA_EN_MATERIALES_ORGANICOS

Universidad de Granada, Departamento de Edafología y Química Agrícola, España. c2010. Edafología. Lección 3. Constituyentes del suelo. El agua y los gases (en línea). Consultado 15 dic. 2025. Disponible en <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema03/tema.htm>.

Vélez Zapata, HM. 2021. *Determinación de las curvas de retención de humedad de un suelo mediante diferentes metodologías para su aplicación en el manejo del riego* [en línea]. Tesis Mtr. Valencia, España, Universitat Politècnica de València. Consultado 22 nov. 2025. Disponible en <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/617edc7b-e9a0-4e17-93e7-3b03be27004a/content>

Vera, C. 2012. *Componentes del suelo*. Consultado 25 jun. 2026. Disponible en: <https://cveranay.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/05/componenrtes-del-suelo.pdf>.

Webster, AL. 2000. Análisis de correlación y regresión (en línea). In Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Ciudad de México, México, McGraw-Hill. p. 559-614. Consultado 15 mar. 2024. Disponible en https://www.mcgraw-hill.com.mx/pye01e/cap13/13analisis_de_correlacion_y_regresion.pdf.

Zambrano Navarrete, XA; Caicedo Toro, MD; Faréz-Román, V. 2021. Balance hídrico distribuido con funciones de pedotransferencia para estimar eventos extremos. Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores 8(spe2). <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2607>

IX. ANEXOS

Anexo 1. Kit Muestreador de Suelo
“Soil Core Sampler” (Model 0200)



Anexo 2. Cilindros muestreadores modelo
0200



Fuente: (Soilmoisture Equipment Corp. 2017).

Anexo 3. Ollas de Presión Richards
(Laboratorio riegos UNAG)



Fuente: (Soilmoisture Equipment Corp. 2017).

Anexo 4. Placa de cerámica porosa



Anexo 5. Muestras de suelo indisturbadas



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Toma de muestras a las profundidades seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Esquema de ollas de presión Richards



Fuente: (Chávez *et al.*2013)

Anexo 8. Muestras de suelo indisturbadas con papel filtro



Fuente: Elaboración propia

Anexo 9. Muestras de suelo indisturbadas en saturación por capilaridad



Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Muestras indisturbadas dentro de la Olla Richards



Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Aplicación de presión (0.01 Bar)



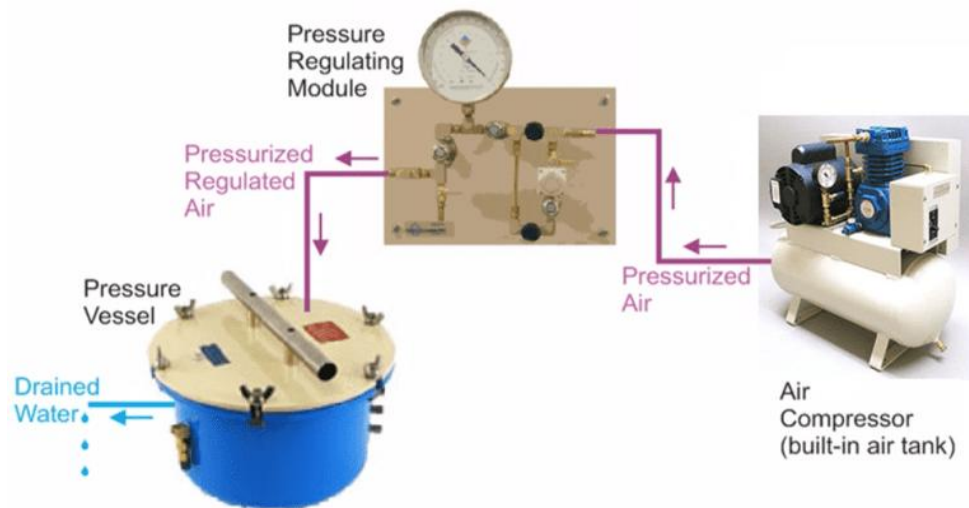
Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Vista drenaje de muestras sometidas a presión



Fuente: Elaboración propia

Anexo 13. Esquema funcionamiento de las Ollas Richards



Fuente: (Soilmoisture Equipment Corp. 2017).

Anexo 14. Pesaje muestras húmedas (0.01 bar)



Fuente: Elaboración propia

Anexo 15. Muestras indisturbadas puestas en el horno



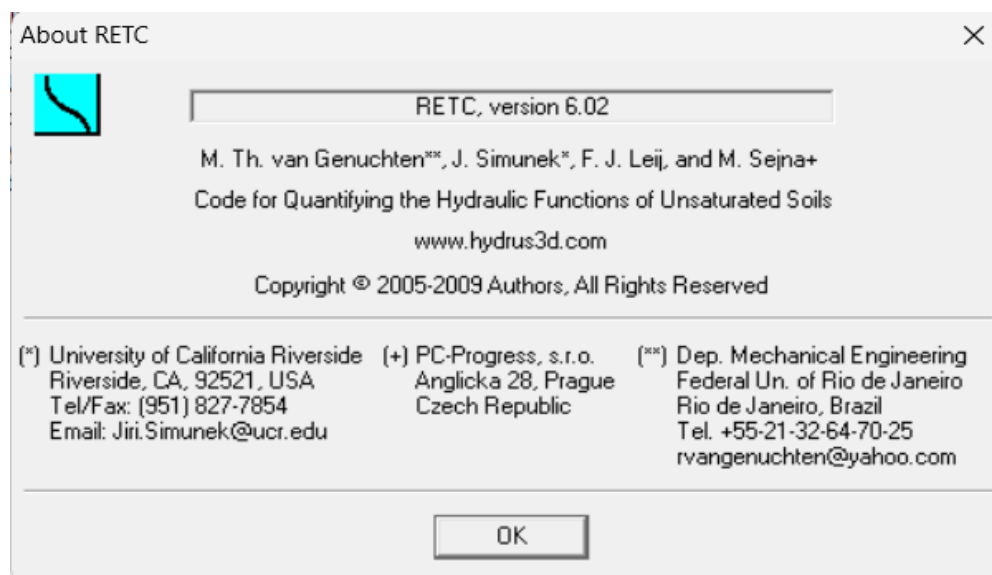
Fuente: Elaboración propia

Anexo 16. Software SAS (Statistical Analysis System)

h10 - GLMSELECT Backward										
Permanencia por $p \leq 0.05$ y eleccion por menor RMSE-CV										
Procedimiento GLMSELECT										
Conjunto de datos	WORK.DATA									
Variable dependiente	h10									
Método de selección	Hacia atrás									
Criterio de selección	Nivel de significación									
Criterio de detención	Nivel de significación									
Criterio de elección	Validación cruzada									
Nivel de significación de permanencia (SLS)	0.05									
Método de validación cruzada	Aleatorio									
Partición de validación cruzada	5									
Semilla de número aleatorio	12345									
N.º observaciones leídas	24									
N.º observaciones usadas	24									
Dimensiones										
Estimaciones de parámetro										
Parámetro	DF	Estimación	Estimación estandarizada	t valor	Estimador de validación cruzada					
					1	2	3	4	5	
Intercept	1	96.963046	0	5.84	100.4	102.534	111.467	107.586	104.254	
MO	1	1.818345	0.223884	1.50	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	
DA	1	-31.874037	-1.079860	-4.91	-31.6	-30.168	-35.175	-35.452	-33.350	
PO	1	-0.530004	-0.608124	-2.73	-0.5	-0.607	-0.644	-0.515	-0.548	
CE	1	19.236726	0.146282	0.94	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 17. Software RETC



Fuente: Elaboración propia