

Universidad Agraria de La Habana

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Ingeniería Agrícola

**LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD Y SU
ESTIMACIÓN MEDIANTE FUNCIONES DE
PEDOTRANSFERENCIA EN SUELOS AGRÍCOLAS DE
ARTEMISA Y MAYABEQUE**

**Tesis en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Agrícolas**

Autor: MsC. Jorge García Coronado

Tutor: Dr. Hanoi Medina González

MAYABEQUE, 2011

A LA MEMORIA DE MI MADRE

AGRADECIMIENTOS

- A mi tutor, Dr. Hanoi Medina González, por su idea original, por motivar mi incorporación, por su presencia en el campo y en el laboratorio, por su intuición, su rigurosidad, en fin por todo el tiempo dedicado desde disímiles sitios y responsabilidades a la orientación y revisión precisa de este trabajo de tesis. Amigo disculpa mis retrasos, mis enfados, mi tozudez y, principalmente, el tiempo que te robe a ti y a tu familia. En fin, eternamente agradecido.
- A la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS) por aprobar y financiar el proyecto de cuyo fruto es resultado el presente trabajo.
- A mi familia más allegada, mis aliados de sangre y espíritu, a mi papá a quién debo la mitad de mi existencia, a mis dos hermanos, a mis cuñadas, a mis tres maravillosos sobrinos.
- A Berta que con solo su presencia reinaba la cordura, la dedicación y consecución de este trabajo. Con ella conviví buena parte de esta etapa. Nada más parecido a una relación madre e hijo.
- A los miembros de las Comisiones Científicas de las Facultades de Mecanización y Agronomía, del Instituto de Suelos y del IIRD por acoger y contribuir a mejorar el trabajo y su exposición.
- A mis compañeros del GIAF por la solidaridad y el apoyo que me han brindado: María Elena, Gustavo, Jorgito, Zuzell, Yele, Dámaso y Andrés.
- A todos mis compañeros de departamento y de facultad, en especial a Gemma mi Jefa de Dpto. por procurar a toda costa mi dedicación al trabajo de tesis.
- A mis oponentes de la predefensa Lázarita Otero, Carlos Balmaseda y demás miembros del tribunal que tanto me ayudaron en aquella necesaria etapa.
- A Liudmila, Ciro, Armando y Demetrio por su experiencia, coordinación y guía acertada en la consecución de los requisitos inherente al proceso.
- A Nelsón y a Leichy por su solidaridad.
- A toda la dirección de la Universidad Agraria de La Habana por el apoyo que me han brindado.

Citación correcta Norma ISO 690

Según Sistema de Referencia Numérico

1. Garcia-Coronado, Jorge. Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Universidad Agraria de La Habana, 2011. 124 p.

Según Sistema de Referencia Apellido, año

Garcia-Coronado, Jorge. 2011. Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Universidad Agraria de La Habana. 124 p.

SÍNTESIS

La curva de retención de humedad del suelo (CRHS) es una propiedad indispensable para el adecuado manejo agrícola, hidrológico y medioambiental. Sin embargo, factores como la elevada variabilidad espacial y el alto costo de su determinación limitan severamente la disponibilidad de información vinculada con esta propiedad. Los objetivos de este trabajo de tesis son: (i) caracterizar la variabilidad de las curvas de retención de humedad de suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque y la influencia que sobre ella tienen las principales propiedades físicas, químicas y físico-químicas; (ii) desarrollar nuevas funciones de pedotransferencia para la estimación de las curvas de retención de humedad a partir de otras propiedades de suelos disponibles o más fácilmente medibles y (iii) demostrar la importancia de las curvas de retención de humedad en el manejo hidrológico de un suelo Ferralítico de la región. Con esos fines se desarrolló una campaña de muestro intensivo siguiendo un diseño estratificado, aleatorizado, no alineado, a partir del cual se obtuvieron valores de la curva de retención de humedad, y otras propiedades fundamentales del suelo en 116 puntos, distribuidos en ambas provincias, a dos profundidades, 10-15 y 35-40 cm. El seguimiento de la variabilidad del potencial hídrico en un suelo Ferralítico de la región y un análisis estadístico matemático, basado en la modelación del efecto de la variabilidad en la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones, permitió demostrar la importancia práctica de las CRHS. En el estudio se logran identificar cinco agrupamientos de curvas en la región, tres de ellos asociados a los suelos Ferralíticos. Se encuentra que la densidad aparente, el contenido de calcio y los porcentajes de agregados menores de 2 mm son las variables más fuertemente relacionadas con la propiedad hidráulica en la región de estudio. La textura y la materia orgánica, tradicionalmente utilizadas en PTFs a nivel internacional, poseen escasa influencia. Se obtiene una elevada gama de PTFs que permiten estimar la CRHS en un espectro amplio de circunstancias. Por lo general estas proporcionan mejores estimaciones de la humedad en el rango de potenciales cercanos a la saturación ($0.97 < R^2 > 0.8$ y $0.012 < RECM < 0.042$), y por ende los más útiles en el manejo, que para los menores a -30kPa ($0.84 < R^2 > 0.6$ y $0.032 < RECM < 0.062$). Se demuestra, no obstante, que el uso del patrón espacial de los residuos puede mejorar las estimaciones de las PTFs en puntos no medidos con hasta un 16 % de reducción de la varianza no explicada. Por último, la modelación del efecto de la variabilidad de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en la dinámica de la humedad de un suelo Ferralítico Rojo de Bainoa, refleja el grado de sensibilidad de los términos del balance hídrico a la curva de retención de humedad y al valor umbral de potencial para el inicio del riego.

TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

INTRODUCCION.....	1
1. CONCEPTOS BASE Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	6
1.1 Estado del agua en el suelo.....	6
1.1.1 Contenido de humedad del suelo.....	6
1.1.2 Potencial del agua en el suelo.....	6
1.2 Curva de retención de humedad del suelo.....	8
1.2.1 Expresión paramétrica de la curva.....	10
1.2.2 La curva de retención y el flujo del agua en el suelo.....	11
1.2.3 La curva de retención y la distribución poral del suelo.....	12
1.3 Métodos de determinación de la curva de retención de humedad.....	14
1.3.1 Métodos directos.....	14
1.3.2. Métodos indirectos.....	15
1.4 Funciones de pedotransferencia (PTFs).....	16
1.4.1 Funciones de pedotransferencia hidráulicas.....	17
1.4.2 Métodos lineales y redes neuronales.....	19
1.4.3 Variables de entrada de las PTFs.....	20
1.5 Relación entre la CRHS y otras propiedades del suelo.....	22
1.5.1 Textura del suelo.....	22
1.5.2 Contenido de materia orgánica.....	23
1.5.3 Densidad aparente.....	25
1.5.4 Estructura del suelo.....	25
1.5.5 Capacidad de cambio de bases.....	27
1.6 La curva de retención de humedad en suelos de Cuba.....	27
1.7 Características generales de los suelos de Artemisa y Mayabeque.....	29
1.7.1 Principales agrupamientos de suelos.....	29
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
2.1 Área de estudio.....	34
2.2 Diseño experimental.....	36
2.3 Propiedades medidas.....	37
2.4. Metodología general de los análisis desarrollados.....	40
2.4.1 Análisis exploratorio de la información.....	41
2.4.2 Relación entre agrupamientos de suelos y agrupamientos de curvas.....	42
2.4.2.1 Agrupamiento espacial de las curvas de retención de humedad.....	42
2.4.3 Análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo medidas.....	43
2.4.4 Desarrollo y validación de funciones de pedotransferencia.....	44
2.4.4.1 Subconjuntos de desarrollo y validación.....	45
2.4.4.2 Métodos de ajuste de las PTFs.....	47
2.4.5 Evaluación de la contribución de la información espacial en el ajuste de las PTFs.....	49
2.4.6 Las curvas de retención y su relación con el efecto del régimen hídrico en los suelos de la región.....	50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
3.1 Breve descripción de las propiedades medidas.....	53
3.1.1 Comportamiento de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas.....	53
3.1.1.1 Correlación entre propiedades.....	56
3.1.1.2 Variabilidad espacial de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas.....	59
3.1.2 Descripción de las curvas de retención de humedad.....	62
3.1.2.1 Curva de retención de humedad por tipos de suelos.....	63
3.1.2.2 Correlación entre las CRHS y las propiedades medidas.....	64
3.1.2.3 Correlación espacial cruzada.....	69

3.2 Relación entre agrupamientos curvas de retención y los de suelo.....	71
3.2.1 Agrupamiento espacial de las curvas de retención de humedad	71
3.2.2 Relación entre agrupamientos de CRHS y las propiedades medidas.....	78
3.3 Desarrollo de funciones de pedotransferencia (PTFs).....	81
3.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple.....	81
3.3.2 Análisis de redes Neuronales	86
3.3.3 PTFs de suelos Ferralíticos	88
3.6.4 PTFs por agrupamientos de curvas.....	89
3.4 Análisis de la incertidumbre asociada al modelo y a las variables de entrada	93
3.5 Importancia práctica de las CRHS y el balance hídrico de un suelo bajo el efecto de la variabilidad de las precipitaciones.....	96
CONCLUSIONES.....	100
RECOMENDACIONES.....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXOS.....	122
Anexo 1.Semivariogramas	122
Anexo 2.Glosario de términos y abreviaturas.....	123

INTRODUCCION

El suelo constituye el componente principal de los ecosistemas terrestres y, como tal, uno de los recursos naturales más importantes para la vida en nuestro planeta (Lal y Shukla, 2004). Entre las numerosas funciones, cobra creciente interés en la comunidad científica el papel fundamental de este medio en el ciclo hidrológico. El suelo actúa como condición de frontera que regula la partición del agua (entre la infiltración y escorrentía) y, a través del balance de energía, impone la dinámica que determina el nivel de disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, y provee las condiciones para el desarrollo de un sinnúmero de procesos que a su vez intervienen en el flujo del agua y el transporte de solutos.

La humedad de los suelos se reconoce como la variable que mejor sintetiza la compleja interacción entre el clima, el suelo y la vegetación (Entekhabi *et al.*, 1996; Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2004). Juega un papel importante en las predicciones del clima y del tiempo a escala regional y global (Vereecken *et al.*, 2008; Escorihuela *et al.*, 2010). Controla la infiltración, la precolación profunda y la generación de escorrentías, es crucial en la producción agrícola, la salud de los cultivos y los procesos de salinización y contaminación en los suelos. En adición, desempeña un rol fundamental en la organización de los ecosistemas naturales y la biodiversidad, especialmente en condiciones de escasa disponibilidad de agua (Porporato *et al.*, 2002).

Los estudios relacionados con la dinámica de la humedad a través de la hidrología de suelos son sin embargo sumamente complejos debido al gran número de procesos y fenómenos que en ellos intervienen, así como la elevada variabilidad en tiempo y espacio de esos fenómenos. Esta rama de las geociencias se considera como la que ha evolucionado de manera más sorprendente en las últimas décadas (Katul *et al.*, 2004), dando incluso lugar a campos emergentes de investigación como la ecohidrología o la hidrometeorología.

El elevado grado de complejidad y el trascendental avance tecnológico de las últimas décadas han conllevado al desarrollo los modelos de simulación consideradas en la actualidad herramientas indispensable para el avance científico de esta rama (Loosvelt *et al.*, 2011). Los mismos son capaces de capturar los aspectos esenciales de la dinámica (Manyame *et al.*, 2007), aun cuando simplifiquen en menor o mayor grado la interacción entre los diferentes elementos. Gran parte de los modelos sintetizan el comportamiento hidráulico de los suelos a partir de relaciones no lineales entre la humedad, θ , el potencial matricial, h , y la conductividad hidráulica (Hillel, 1998; Romano y Palladino, 2002).

Dichas relaciones se identifican a través de la curva de retención de humedad de los suelos, $\theta(h)$ (en lo adelante se usa CRHS) y la función conductividad hidráulica, $K(h)$, reconocidas como propiedades hidráulicas del suelo (Kutílek, 2005). La conductividad hidráulica es en mayor o menor grado dependiente de la CRHS, siendo esta última catalogada como la propiedad hidráulica fundamental (Rawls *et al.*, 2003 y Nielsen y Wendroth, 2003). Es por ello, la caracterización de la CRHS es considerada indispensable para el adecuado manejo hídrico de los suelos.

Dos factores dificultan ostensiblemente la disponibilidad de información con respecto a esta propiedad hidráulica. Uno es el relacionado al problema de la determinación por métodos directos. Estos métodos proveen descripciones precisas de la misma y son muy efectivos a escala de un punto, sin embargo son métodos costosos que requieren tiempo y esfuerzo (Rawls *et al.*, 1982; Romano y Palladino, 2002; Hodnett y Tomasella, 2002; Pachepsky y Rawls, 2004; Matula *et al.*, 2007).

El otro inconveniente está asociado a la elevada variabilidad espacial de esta propiedad (Nielsen *et al.*, 1973; Romano y Palladino, 2002), debida fundamentalmente a la influencia de factores geológicos, pedológicos y de manejo (Zhai *et al.*, 1990; Mapa *et al.*, 1986; Or y Ghezzehei, 2002; Strudley *et al.*, 2008; Mubarak *et al.*, 2010). La adecuada representación de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulica es hoy en día uno de los principales desafíos en los esfuerzos de modelación de los procesos que tienen lugar en la superficie terrestre a escala regional y continental (Zhu y Monhanty, 2003). Esta gran variabilidad hace a su vez imprácticos el uso de los métodos directos en aplicaciones a escalas de unos pocos kilómetros o superiores (Romano, 2004).

Tales inconvenientes han propiciado el desarrollo de un grupo de métodos indirectos que permitan estimar la curva de retención de humedad por vía indirecta, por un lado, y el empleo de eficaces herramientas estadísticas y matemáticas para la adecuada regionalización espacial, por otro lado. Un salto cualitativo en este último aspecto estuvo aparejado al desarrollo de la geostatística, y en particular, al método de interpolación kriging hace ya unas décadas (Journel y Huijbregts, 1978; Matheron, 1982; Goovaerts, 1997).

En cuanto a los métodos indirectos, estos representan una evolución natural y extensión de los métodos directos (Hopmans *et al.*, 2002), apoyados en el nexo entre pedología e hidrología del suelo (Bouma y van Lanen, 1987; Bouma, 1989). El más extendido de ellos es el basado en funciones de pedotransferencia (PTFs) (Rawls *et al.*, 1982; Vereecken *et al.*, 1989; Rawls *et al.*, 1991; Batjes, 1996; Pachepsky y Rawls., 1999; Wösten *et al.*,

2001; Minasny y Mcbratney, A.B. 2000; Rawls, 2004; Tomasella y Hodnett, 2005; Santra y Das, 2008), que permite estimar la CRHS a partir de otras propiedades de suelo disponibles o fácilmente medibles (Baker y Ellison, 2008).

La mayoría de las PTFs desarrolladas para la estimación de propiedades hidráulicas han sido derivadas con datos de suelos de clima templado, y por tanto empleadas con confianza solo dentro de restringidos rangos de suelos y condiciones ambientales (Bastet *et al.*, 1999), lo cual les resta valor práctico en el trópico, incluso tratándose de aquellas más universales (Tomasella y Hodnett, 2005). En su gran mayoría se sustentan en el empleo de los valores de textura, densidad aparente y la materia orgánica, reconocidamente insuficientes para caracterizar la curva en suelos tropicales (van der Berg *et al.*, 1997; Medina *et al.*, 2002; Tomasella *et al.*, 2003; Tomasella y Hodnett, 2005). Es por ello, se tratan de incorporar otras variables que permitan reducir la incertidumbre e incrementar la aplicabilidad de las estimaciones usando las PTFs (van der Berg *et al.*, 1997; Pachepsky *et al.*, 1998; Pachepsky y Rawls, 2003; Palladino, 2000; Hodnett y Tomasella, 2002; Romano y Palladino, 2002; Guber *et al.*, 2003; Santra y Das, 2008).

A pesar que los estudios relacionados con la caracterización de las CRHS se iniciaron en Cuba hace ya cuatro décadas, solo se reportaban hasta el 2003 un total de 176 CRHS a partir de muestras inalteradas (Ruiz y Medina, 2003). Sin demeritar esfuerzos, la validez práctica de estas determinaciones es generalmente escasa, ya sea porque la mayor parte de ellas se obtuvo a partir de muestras alteradas, o porque se determinaron a partir de muestreos no georeferenciados, o simplemente por el tiempo que ha mediado desde la determinación. Tampoco existe una amplia base de datos actualizada y bien georeferenciada de propiedades del suelo que pueda ser empleada para estimar la CRHS a través del uso de PTFs. Medina *et al.* (2002) demostró que muchas de estas relaciones son además ineficaces en predecir el comportamiento de retención, por lo que se impone desarrollar nuevas funciones.

El desarrollo de estudios vinculados a la adecuada caracterización de las CRHS y la obtención de funciones de pedotransferencia es un imperativo para los nuevos desafíos que se presentan en Cuba en torno al uso eficiente de los recursos, en particular agua y suelo. El proyecto de lineamientos de la política económica y social de nuestro país para el próximo quinquenio aboga en su numeral 124 por “sostener y desarrollar las investigaciones sobre la adaptación y mitigación al cambio climático, la conservación y el uso racional de los recursos naturales, en particular de los suelos, el agua y los bosques...”.

La degradación de los suelos se reconoce como uno de los principales problemas del medioambiente cubano. Más allá del mayor o menor grado de niveles de degradación, sobre lo cual existen discrepancias, toda la comunidad científica vinculada al tema reconoce la severidad de los procesos como la erosión, la compactación, la salinización, entre otros. Gran parte de estas problemáticas se asocia a factores antrópicos y, en particular, al mal manejo hídrico de los suelos.

Interés especial poseen los suelos agrícolas de la antigua provincia La Habana, hoy pertenecientes a Artemisa y Mayabeque, los más intensivamente usados por su potencial agro-productivo. Con solo el seis por ciento de las áreas cultivables, estos suelos aportan alrededor del 30 % de la producción agrícola del país. La región dispone a su vez de la mayor infraestructura para la irrigación y el más elevado nivel de mecanización agrícola del país. Los suelos de la Llanura Roja de La Habana, con más de cuatro siglos de explotación agrícola, exhiben la mayor influencia de la agricultura en sus propiedades (Hernández *et al.*, 2006), todo lo cual ha conllevado a una agudización de las problemáticas, poniendo en riesgo a mediano y largo plazo la productividad de los suelos y la propia seguridad alimentaria.

A ello se suma el problema creciente de la variabilidad climática, en especial la variabilidad en la ocurrencia en intensidad de las precipitaciones, elemento que añade gran incertidumbre en el manejo. Las evidencias observacionales indican que el clima de Cuba se ha hecho más cálido, y este incremento de la temperatura ha estado acompañado de una reducción del total de precipitaciones anuales del 10 al 20%, un aumento de la variabilidad interanual del 5 al 10% y un aumento de la aridez y la erosión de los suelos (Lapinel, 1988; Centella *et al.*, 1997; Centella *et al.*, 1998; Lapinel, 2003).

El **Problema científico** que motivó la presente investigación es:

¿Cómo lograr una adecuada caracterización de las curvas de retención de humedad de los principales suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque, atendiendo a la elevada variabilidad espacial de esta propiedad y su costosa determinación, para conocer la dinámica espacio temporal de la humedad y con ello favorecer el eficiente manejo agrícola, hidrológico y medioambiental a escala regional?.

La solución del problema fue abordada a partir de la **Hipótesis** siguiente:

Un muestreo intensivo de la curva de retención de humedad y otras propiedades físicas, químicas y físico químicas relacionadas con la capacidad de retención hídrica de los principales suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque, siguiendo un esquema eficiente

de muestreo, permitirá caracterizar adecuadamente la variabilidad espacial de esta propiedad hidráulica y desarrollar funciones de pedotransferencia para estimar dicha relación en puntos no medidos.

Sobre la base de esta hipótesis se definió el **Objetivo General** de la investigación:

Caracterizar las curvas de retención de humedad de los principales suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque y desarrollar funciones de pedotransferencia que permitan estimar esta propiedad a partir de otras propiedades físicas, químicas y físico-químicas.

Los **Objetivos Específicos** fueron los siguientes:

- Caracterizar la variabilidad de las curvas de retención de humedad de suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque y la influencia que sobre ella tienen las principales propiedades físicas, químicas y físico-químicas.
- Desarrollar nuevas funciones de pedotransferencia para la estimación de las curvas de retención de humedad a partir de otras propiedades del suelo disponibles o más fácilmente medibles.
- Demostrar, mediante un estudio que combina un experimento de campo y un análisis estadístico matemático, la importancia de las curvas de retención de humedad en el manejo hidrológico de un suelo Ferralítico de la región.

Novedad Científica

- Constituye uno de los pocos estudios a nivel internacional que a esa escala provee funciones de pedotransferencia para la estimación de las curvas de retención de humedad en suelos tropicales.
- Es una de las pocas aplicaciones de su tipo a nivel mundial que cuantifica la relación entre la variabilidad espacial de numerosas propiedades del suelo y las curvas de retención de humedad.
- Se cuantifica por primera vez el papel de la composición del tamaño de agregados y las bases cambiables en la retención de humedad de los suelos de Cuba.
- Provee la más amplia caracterización de las curvas de retención de humedad de suelos agrícolas en regiones de nuestro país.

1. CONCEPTOS BASE Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1 Estado del agua en el suelo

Procesos como el crecimiento del cultivo, la variación de la temperatura del suelo, el transporte químico, el flujo de recarga hacia el manto freático, entre otros, son fuertemente dependientes del estado del agua en el suelo, el cual está descrito en términos de la cantidad de agua y la energía asociada con las fuerzas a las que se encuentra retenida el agua en dicho medio. La cantidad de agua es definida por el contenido de humedad y su estado energético por el potencial, variables de estado fundamentales en el manejo.

1.1.1 Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo se puede expresar en términos de la humedad gravimétrica (θ_g):

$$\theta_g = \frac{m_{\text{agua}}}{m_s} = \frac{m_{\text{sh}} - m_{\text{ss}}}{m_s} \quad (1.1)$$

donde m_{agua} , m_{sh} y m_{ss} representan la masa del agua, la masa del suelo húmedo y la masa del suelo seco, respectivamente. El contenido de humedad es un término adimensional, que en este caso se representa como kg kg^{-1} (kilogramos de agua por cada kilogramo de suelo seco). Otra forma de representación más comúnmente implicada es a través de la humedad volumétrica (θ_v):

$$\theta_v = \frac{V_{\text{agua}}}{V_T} = \frac{\frac{m_{\text{agua}}}{D_{\text{agua}}}}{\frac{m_s}{D_a}} \cong \theta_g \cdot \frac{D_a}{D_{\text{agua}}} \quad (1.2)$$

donde V_T (m^3) es el volumen total (considerando el suelo como un sistema trifásico) que ocupa la muestra, V_{agua} (m^3) es el volumen de agua y D_{agua} y D_a (kg m^{-3}), son la densidad del agua y la densidad aparente del suelo, respectivamente. En este otro caso la humedad se expresa en $\text{m}^3 \times \text{m}^{-3}$ (metros cúbicos de agua por cada metro cúbico de suelo).

1.1.2 Potencial del agua en el suelo

A cada una de las fuerzas de diferente naturaleza que retienen el agua en el suelo se le asocia un potencial, cuyo gradiente determina la dirección del flujo en el medio. El potencial

°1. Conceptos Base...

es una expresión o un indicador de la energía potencial contenida en el agua del suelo relativo a un reservorio de agua pura a presión atmosférica (no confinada) y a la misma temperatura y nivel como la del suelo (Lal y Shukla, 2004). Físicamente representa el trabajo para mover una unidad de masa de agua desde un punto de referencia con potencial cero hasta el punto de interés. Los potenciales se agrupan en potencial de presión (ψ_p), matricial (ψ_m), gravitacional (ψ_z), osmótico (ψ_π) y de sobrepresiones (ψ_o).

$$\psi_T = \psi_p + \psi_m + \psi_z + \psi_\pi + \psi_o \quad (1.3)$$

El potencial de presión (ψ_p) existe únicamente en zonas saturadas y es igual a la presión ejercida por una columna de agua sobre un punto específico dentro del suelo. En la práctica, su valor se considera cero al nivel de presión atmosférica y positivo, e igual a la profundidad de la columna de agua, para puntos que subyacen por debajo de la superficie.

El potencial matricial (ψ_m) solo existe en suelos no saturados. Por tanto, el ψ_m y el ψ_p son mutuamente exclusivos. El signo de ψ_m es negativo (menor que la presión atmosférica) y es debido a las fuerzas de tensión superficial, adhesión- cohesión, contracción-dilatación y las de la interfase entre la partícula y el agua, que tienen lugar en la matriz del suelo.

Según Jury *et al.*, (1991) el ψ_m tiene en cuenta además al potencial de capilaridad (ψ_{cap}) y el de aire (ψ_a). El ψ_{cap} es el trabajo requerido para transferir de manera reversible e isotérmica una cantidad infinitesimal de agua desde un reservorio en el suelo hasta el punto de interés. Por su parte ψ_a es la presión del aire en el suelo relativa a la presión del aire en un estado estándar. En presencia de suelos no expansivos En la práctica ψ_a es despreciado.

El potencial gravitacional (ψ_z) es la energía requerida para mover una cantidad infinitesimal de agua pura y libre desde el nivel de referencia hasta el punto de elevación. Este potencial es debido estrictamente a la posición de un punto específico y es independiente de las propiedades del suelo o condiciones atmosféricas. Sus magnitudes dependen con la distancia vertical entre la referencia y el punto en cuestión. En el caso de suelos saturados $\psi_{Total} = \psi_p + \psi_z$, es decir solo se tienen en cuenta dos de sus componentes.

El potencial osmótico (ψ_π) se debe a la presencia de solutos en el agua del suelo que afectan sus propiedades termodinámicas. Se manifiesta cuando el agua es absorbida en presencia de membranas y es importante en lo referente a la absorción de agua por las raíces de las plantas.

El potencial de sobrepresiones (ψ_o) es el cambio de energía por unidad de volumen de agua debido al peso del material sólido que permanece por encima del agua en el suelo. El mismo es significativo en suelos expansivos.

Los potenciales anteriormente referidos expresan unidades de energía por unidad de volumen, de masa y de peso, en dependencia de lo cual pueden verse representados en Pascal (Pa), bar, la atmósfera (atm) y centímetro de agua (cm).

1.2 Curva de retención de humedad del suelo

La relación entre el contenido de humedad (θ) y el potencial matricial del suelo (ψ_m o h) se denomina curva de retención de humedad y se representa como $\theta(h)$. Esta relación es única para un suelo en particular (Lal y Shukla, 2004), por lo cual en ocasiones se le denomina curva característica de retención de humedad. Otras denominaciones comúnmente empleadas son las de curva tensión-humedad (CTH) o curva pF (en cuyo caso la humedad se gráfica en función del logaritmo del potencial matricial).

Según Tietje y Tapkenhinrichs (1993), una función de retención es una función monótona que nos indica el contenido de agua para una escala dada del potencial matricial o expresado como presión o carga succión y además una relación histérica consistente de dos funciones de 1^{er} tipo, incluyendo las ramas de mojado y secado. En el fenómeno de histéresis intervienen el aire atrapado, el proceso de contracción - dilatación de las arcillas y el efecto de embotellamiento (asociado a poros con diámetro variable). Sin embargo, es universalmente aceptado que las variaciones espaciales de las propiedades del suelo dominan sobre el efecto de histéresis, por lo cual este fenómeno no se toma en cuenta en la mayoría de las aplicaciones.

Se considera que la CRHS está determinada de manera primaria por (i) la distribución del tamaño de poros y (ii) la interacción de la de materia orgánica, el contenido de arcilla (textura) y la mineralogía de las arcillas (Hillel, 1998). A su vez, la distribución del tamaño de poros está fuertemente condicionada por la distribución del tamaño de partículas (textura) y al grado de organización estructural, lo cual está asociado a las fuerzas de capilaridad. Estas fuerzas de capilaridad son responsables del nivel de retención a los potenciales altos y medios de la curva. En tanto, la interacción de la materia orgánica, el contenido de arcilla (textura) y la mineralogía de las arcilla condiciona el nivel de retención a los potenciales bajos de la curva asociados a las fuerzas osmóticas y de adsorción.

°1. Conceptos Base...

En la Figura 1.1 se muestran los rasgos generales de una curva de retención de humedad del suelo (CRHS). Cuando el potencial es igual a cero, el valor de humedad correspondiente se denomina humedad de saturación (θ_s), en el cual todos los espacios en la matriz del suelo están ocupados por agua. Para potenciales matriciales cercanos a la saturación el agua es retenida en contra de la gravedad por las fuerzas de capilaridad.

La disminución del contenido de humedad de saturación bajo la acción gravitatoria da lugar a un reemplazo paulatino del agua en la matriz del suelo por el aire. Al valor del potencial a partir del cual se inicia dicho reemplazo se le denomina valor de entrada de aire y al contenido de humedad asociado capacidad de campo o límite superior del agua disponible. El agua almacenada entre el potencial de saturación y el de entrada de aire se asocia a los poros más grandes y, como tal, es la más débilmente retenida.

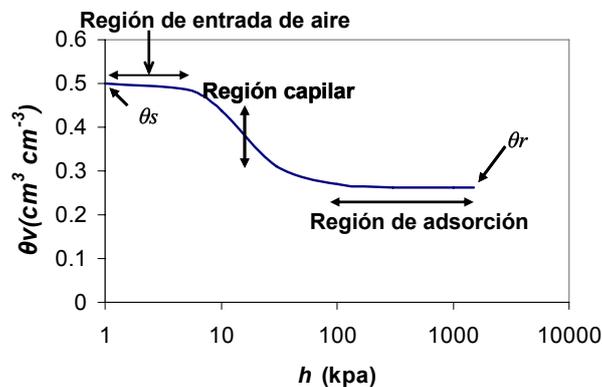


Figura 1.1. Curva de retención de humedad del suelo.

En cambio, para potenciales muy bajos el agua es muy fuertemente retenida por las fuerzas las fuerzas de origen electrostático ya mencionadas. El contenido de humedad remanente en el suelo se conoce como humedad residual (θ_r) o punto de marchitez permanente y su valor se asocia con el límite inferior del agua disponible en el suelo. Entre este límite inferior y el superior de agua se define la disponibilidad de agua del suelo para la planta.

La Figura 1.2 refleja esquemáticamente el efecto sobre la curva de retención de humedad que, a grandes rasgos, poseen algunas de las propiedades más importantes del suelo como son: la textura, la materia orgánica y la estructura. No obstante estas tendencias no son verdades absolutas. En la Figura 1.2 a, por ejemplo, se asocia a los suelos de textura fina un mayor poder de retención en todo el rango de potenciales, lo cual en la práctica varía en dependencia del tipo de suelo.

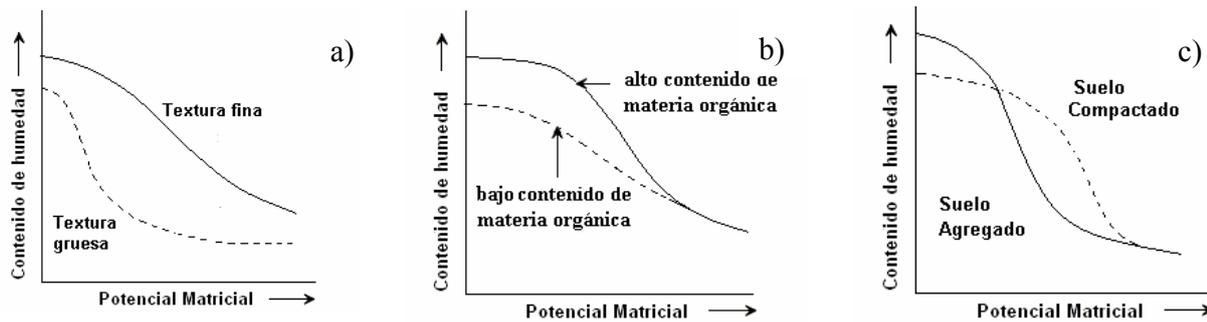


Figura 1.2. Representación esquemática de los efectos que sobre la curva de retención de humedad tiene: a) la textura b) los contenidos de materia orgánica y c) diferente estructura.

Pero no es interés en este acápite profundizar en los factores físicos que conllevan a esta respuesta. Ello se aborda con posterioridad más adelante. No obstante refleja bien la compleja relación entre las propiedades más comúnmente medidas y la CRHS.

1.2.1 Expresión paramétrica de la curva

La mayoría de los modelos matemáticos de procesos hidrológicos sintetizan el comportamiento hidráulico de los suelos usando relaciones entre el contenido de humedad, el potencial matricial y la conductividad hidráulica (Hillel, 1998). La curva de retención es una variable requerida en la modelación de los diferentes procesos (Cornelis *et al.*, 2005). La dependencia del contenido de humedad con el potencial ($\theta(h)$) es usualmente representado por una ecuación analítica con un determinado número de parámetros (Tomasella *et al.*, 2003). En este sentido han sido propuestas varias funciones para representar la curva.

Entre las expresiones más empleadas se puede citar el modelo de Brooks y Corey (1966).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_d}{h} \right)^\lambda, & h \geq h_d \\ \theta_s, & h < h_d \end{cases} \quad (1.4)$$

donde h_d es el valor del potencial de entrada de aire (cm) y λ es un parámetro de distribución de poros.

La principal desventaja de este modelo está relacionada con su carácter discontinuo, particularmente al describir la retención de humedad cercano a saturación (van Genuchten y Nielsen, 1985).

Otro modelo muy difundido es el de Gardner *et al.* (1970):

$$h = \alpha \times \theta^{-b} \quad (1.5)$$

donde a y b son parámetros para el ajuste de los datos experimentales.

El modelo Genuchten (1980) es la relación más comúnmente empleada en la actualidad:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad (1.6)$$

donde α (m^{-1}), n (-) y m (-) son parámetros de ajuste del modelo. En la mayoría de los casos se asume que $m = 1-1/n$ (van Genuchten y Nielsen, 1985).

Es usual que este modelo se exprese en términos de la saturación efectiva (Θ) o humedad paramétrica, definida convenientemente por la relación:

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (1.7)$$

resultando una expresión para 1.6 como sigue:

$$\Theta = [1 + \alpha |h|^n]^{-m} \quad (1.8)$$

El modelo de van Genuchten (1980) es el más difundido a nivel mundial y el que logra el mejor ajuste de los datos experimentales de la CRHS de los suelos de Cuba (Ruiz y Utset, 1992).

1.2.2 La curva de retención y el flujo del agua en el suelo

La gran mayoría de las aplicaciones vinculadas al flujo del agua y el transporte de solutos en los suelos no saturados se basan en la solución de la ecuación de Richards (1931) que, expresada en función del potencial matricial, queda como:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} + \Phi \quad (1.9)$$

donde $C(h)$ es la capacidad hídrica y Φ es el término de extracción de agua por las raíces del cultivo. La $C(h)$ es una función altamente no lineal que representa matemáticamente la primera derivada del potencial con respecto a la humedad. Para su cálculo es imprescindible contar con una relación analítica que caracterice la CRHS, siendo la de van Genuchten (1980) la más empleada en los modelos de simulación. La elevada sensibilidad de estos modelos a la parametrización de $C(h)$ a partir del modelo de van Genuchten es reconocida internacionalmente (Medina, 1999 y Vogel *et al.*, 2001).

Las soluciones de la ecuación de Richards están determinadas por las condiciones iniciales y de frontera existentes en un problema dado y permiten obtener $\theta(z,t)$ y $h(z,t)$, lo cual hace posible predecir el estado de humedad o el potencial matricial a lo largo del perfil del suelo considerado.

Aplicando la teoría de la conductividad hidráulica no saturada de Mualem (1976) y la Ec. 1.6, van Genuchten (1980) derivó la siguiente ecuación que caracteriza la función conductividad hidráulica en términos de la CRHS.

$$K(\theta) = K_s (\Theta)^\chi \left[1 - \left(1 - (\Theta)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (1.10)$$

donde K_s es la conductividad hidráulica saturada y χ es un parámetro asociado a la geometría de poros, el cual se asume generalmente igual a 0.5.

1.2.3 La curva de retención y la distribución poral del suelo

La curva de retención de humedad depende fuertemente de la estructura del suelo, la cual está determinada por la porosidad total y la distribución del tamaño de poros. Según Or *et al.* (2000) y Leij *et al.* (2002), la distribución de tamaño de poros es un reflejo de la CRHS, lo cual permite inferir de manera rápida su distribución a partir de mediciones de la CRHS. Del mismo modo, la curva de retención puede ser obtenida mediante la integración matemática de la distribución del tamaño de poros.

La relación entre el grado de saturación y el potencial matricial, expresado como la altura sobre un nivel de referencia de agua (Figura 1.3), ilustra bien la dependencia directa entre la CRHS y la distribución poral. En ella el suelo, que se representa como un conjunto de poros de diverso diámetro, se embebe en una superficie de agua, provocando el ascenso capilar. Cuando se alcanza la condición de equilibrio el potencial gravitacional en cada poro se iguala al potencial matricial, que a su vez es inversamente proporcional al radio de este. Para altura $z=0$ que equivale a $h=0$ todos los poros están cubiertos de agua. Si se hicieran cortes transversales con un cierto incremento de la altura (que equivale a un decremento del potencial matricial), se vería que, a medida que esta aumenta, se incrementa al número de poros, los de mayor diámetro, desprovistos de agua.

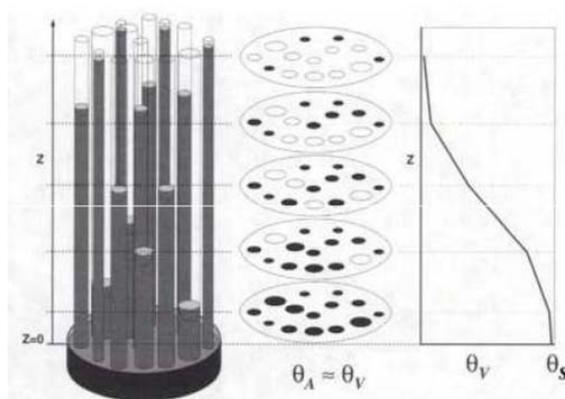


Figura 1.3. Representación esquemática de la relación entre el grado de saturación y el potencial matricial (expresado como la altura sobre un nivel de referencia de agua), ilustrando la retención del agua del suelo a partir de un conjunto de capilares.

Existen varias clasificaciones para designar la porosidad de acuerdo a su origen o posición dentro del suelo (Lal y Shukla, 2004). En la literatura son muy empleados los términos de porosidad estructural y textural o matricial para referir los poros del suelo relacionados con el proceso de retención de humedad en el rango más alto y bajo de la curva (Or *et al.*, 2000; Richard *et al.*, 2001; Or y Ghezzehei, 2002; Lal y Shukla, 2004; Kutilek, 2005).

Según Richard *et al.* (2001) la modificación de la geometría de poros durante la compactación resulta no solo en un decrecimiento del volumen de poros estructurales, sino también en un cambio en la relación entre poros texturales y los remanentes poros estructurales. A causa de la compactación los poros estructurales solo serán accesibles a través de la matriz del suelo (Bruand y Cousin, 1995; Or *et al.*, 2000; Or y Ghezzehei, 2002; Kutilev, 2005). Estas modificaciones traen consigo asociados importantes cambios en la característica de retención de humedad del suelo.

A partir de la relación inversa entre potencial matricial y radio de poros se demuestra que el punto de inflexión de la curva de retención coincide con el pico de la distribución del tamaño de poros, cuando esta se expresa convenientemente como una función del logaritmo del tamaño de poros.

Derivado de lo anterior, Dexter (2004) propone el empleo de la curva en estudios de calidad física del suelo. Partiendo de esta relación este autor considera el valor de la pendiente en el punto de inflexión como una medida de la micro-estructura del suelo que controla muchas de las propiedades físicas claves del suelo. La presencia de cuantiosos poros estructurales y altos valores de la pendiente son esenciales para una buena calidad del suelo. En tanto, el valor del contenido de humedad en el punto de inflexión de la curva se denomina humedad

óptima de labranza y su conocimiento ofrece información acerca de cuán fina o gruesa puede resultar la estructura del suelo posterior a la labranza.

1.3 Métodos de determinación de la curva de retención de humedad

La determinación de las propiedades hidráulicas clasifica como una de las tareas más difíciles de realizar y que más tiempo consumen en el campo de la física de suelos (Minasny y Field, 2005). En su determinación se emplean tanto métodos directos como indirectos. Según Romano y Palladino (2002), ambos métodos proveen descripciones precisas de las funciones $\theta(h)$ y $K(\theta)$ y son muy efectivos a escala de punto (por ejemplo a escala de muestras inalteradas de suelo). En los siguientes subepígrafes se destacan algunos de los aspectos más importantes de estos métodos, haciendo énfasis en las ventajas y desventajas que ofrecen.

1.3.1 Métodos directos

Dentro de los métodos directos se incluyen los métodos de campo y de laboratorio. La determinación de la CRHS *in situ* se basa en la medición simultánea del valor de la humedad y el potencial matricial. Para medir el potencial se usa universalmente el tensiómetro (Lal y Shukla, 2004). Es un dispositivo sencillo, de fácil implementación y relativamente económico. Entre sus principales limitaciones está su restringido rango de medición (0 - 80 kPa) y su reconocida inercia relacionada con el tiempo de respuesta (Klute, 1986).

Para la medición de la humedad se emplean, en cambio, una amplia gama de dispositivos. La medición directa de la humedad, basada en cuantificar las pérdidas de agua de una muestra después de secada en una estufa es el método más exacto (método gravimétrico), pero impracticable en la mayor parte de las aplicaciones por ser un método destructivo y laborioso. Para estudios de campo se ha generalizado el uso de dispositivos de reflectometría de dominio temporal (TDR) y, en menor medida, la sonda de neutrones.

La determinación en campo de la CRHS se lleva a cabo con escasa frecuencia y está casi siempre asociada a propósitos muy específicos de experimentación. Para que la determinación simultánea de valores de potencial y de humedad pueda ser considerada como un punto de la CRHS se requiere que el sistema se encuentre en equilibrio, lo cual generalmente es difícil de alcanzar en condiciones de campo. Su determinación en el laboratorio se lleva a cabo, por excelencia, usando la caja de arena y la olla Richards. En este propósito ambos dispositivos son empleados de conjunto, es decir la CRHS en su rango

más húmedo se evalúa con el empleo de la caja de arena (0 hasta -10 kPa) y su comportamiento en el rango de más bajos potenciales se obtiene con la olla Richards (-10 hasta -1500 kPa).

Tanto en un dispositivo como en el otro, el principio consiste en someter varias muestras de suelo de volumen conocido a varios potenciales, y medir la humedad correspondiente a cada uno de ellos. Las muestras en principio (inalteradas) deben ser saturadas, lo cual puede tardar varias horas o incluso días en dependencia del tipo de suelo. Con posterioridad las mismas se someten al potencial de interés hasta que se establezca una condición de equilibrio hidrostático entre la presión aplicada y la presente en la muestra. Este proceso puede tardar entre 8-10 días de experimentación por cada potencial ensayado, por la misma causa anterior. En sentido general, son métodos notoriamente costosos, que demandan una elevada cuota de tiempo, esfuerzo y personal calificado (Rawls *et al.*, 1982; Vereecken *et al.*, 1989; Carter y Bentley, 1991; Leij *et al.*, 1996; van den Berg *et al.*, 1997; Romano y Palladino, 2002; Hodnett y Tomasella, 2002; Minasny y Mcbratney, 2002; Matula *et al.*, 2007).

La significativa variabilidad espacial que exhibe la CRHS a todas las escalas (Romano y Palladino, 2002) constituye otro aspecto que limita la aplicabilidad de estos métodos. Estos inconvenientes hacen que, a los efectos de una caracterización adecuada del comportamiento de esta propiedad a escala de una región e incluso inferior, las mediciones directas se vuelven imprácticas (Carter y Bentley, 1991), debiéndose recurrir necesariamente al empleo de métodos indirectos de determinación.

1.3.2. Métodos indirectos

Los métodos indirectos representan una evolución natural y extensión de los llamados directos (Hopmans *et al.*, 2002). La determinación indirecta de las propiedades del suelo no puede existir sin la vía directa, porque solo a partir de esta última se crean las bases de datos a partir de las cuales los métodos indirectos son derivados (Wösten *et al.*, 1995). Estos métodos han sido propuestos para identificar parámetros claves que afectan el flujo de agua en la zona no saturada, a partir de variables del suelo accesibles y de más fácil determinación. La mayor extensión que ellos proveen, al menos en principio, es la de más grados de libertad en la selección de apropiadas condiciones experimentales. Permiten además la estimación simultánea de la curva de retención de humedad y la conductividad

hidráulica mediante el procesamiento de datos tomados sin la necesidad de llevar a cabo engorrosos experimentos.

Según Sobieraj *et al.* (2001), en la estimación de las propiedades hidráulicas se distinguen tres categorías de métodos indirectos: 1) modelos de distribución del tamaño de poros, 2) métodos inversos, 3) funciones de pedotransferencia (PTFs). Los modelos de distribución del tamaño de poros típicamente estiman la propiedad hidráulica basados en la distribución, conectividad y tortuosidad de poros. Su alcance se limita a la escala para la cual han sido concebidos, lo cual les resta utilidad práctica.

Los métodos inversos combinan un modelo numérico de la ecuación de Richards con un algoritmo de optimización para calcular parámetros desconocidos a partir de series temporales observadas de infiltración, humedad y/o presión (Kool *et al.*, 1987; Simunek y van Genuchten, 1996 y Abbaspour *et al.*, 1997). Estos métodos tienen el inconveniente de que proveen estimaciones de los parámetros de la CRHS sujetos a las condiciones específicas de la experimentación, así como al error del modelo sobre el que se lleva a cabo la calibración. Como resultado este tipo de métodos arroja lo que en la literatura se conoce como parámetros efectivos (Kabat *et al.*, 1997; Jhorar *et al.*, 2002; Vogel y Roth, 2003), es decir aquellos que responden mejor a un proceso de calibración, en lugar de parámetros reales del sitio experimental.

Como una tercera categoría surgen las funciones de pedotransferencia, las que relacionan tanto a la retención de humedad como a la conductividad hidráulica con otras propiedades del suelo de más fácil medición. Esta categoría es el método más universalmente empleado y será abordada en detalles a continuación.

1.4 Funciones de pedotransferencia (PTFs)

La dependencia de la CRHS con una serie de propiedades del suelo (como se verá en el epígrafe 1.6) ha hecho posible el desarrollo de relaciones matemáticas que permitan su determinación por vía indirecta. 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 le concede a estas propiedades. Según Bouza *et al.*, (1985), el conocimiento sistemático del régimen hídrico de los suelos permite juzgar acerca del carácter de los procesos pedogenéticos que tienen lugar en éstos, coadyugan a

una separación más científicamente fundamentada en los distintos niveles de la clasificación y permiten un uso más eficiente del agua.

Relaciones de este tipo han sido también desarrolladas para estimar propiedades físicas, mecánicas, químicas y biológicas del suelo (Amini *et al.*, 2005; Heuscher *et al.*, 2005; Benites *et al.*, 2007, Martin *et al.*, 2009; Sarmadian *et al.*, 2009; Rashidi y Seilsepour, 2009; Cagliari *et al.*, 2011). En el siguiente subepígrafe se abordan aquellas específicamente relacionadas con la CRHS.

1.4.1 Funciones de pedotransferencia hidráulicas

El término Función de Pedotransferencia (PTF), empleado en la literatura de las ciencias del suelo, define a una función predictiva de cierta propiedad del suelo calculada a partir de otras propiedades usualmente medidas, disponibles, más baratas y de fácil determinación (Tietje y Tapkenhinrichs, 1993; Tietje y Hennings, 1996; Elsenbeer, 2001; Minasny y Mcbratney, 2002; Tomasella *et al.*, 2003; Minasny *et al.*, 2004; Nemesa y Walter, 2006). La mismas son relaciones matemáticas que permiten transferir datos disponibles en aquellos de menor disponibilidad, difícilmente medibles y necesarios para una aplicación particular (Baker y Ellison, 2008).

Muchas instituciones en el campo de las ciencias del suelo han elaborado su propia regla para estimar propiedades del suelo de difícil determinación. En su mayoría son relaciones completamente empíricas, aunque modelos físico – empíricos y modelos basados en la teoría fractal han sido empleados (Minasny y Mcbratney, 2000).

Según Schaap y Leij (1998) las funciones de pedotransferencia se clasifican en PTFs de clases y continuas. El término PTF de clases se refiere a las funciones basadas en un agrupamiento de los datos, casi siempre acorde al comportamiento funcional de diferentes horizontes, pero puede ser también acorde a algún otro criterio (Wösten *et al.*, 1999). En esta vía se elige un solo valor de la propiedad hidráulica para representar cada clase: típicamente la media aritmética o geométrica de los valores dentro de una clase. Este tipo de funciones tienen asociadas los mayores errores de estimación.

Entre ellas se destacan las PTFs de clases texturales, las cuales asumen que suelos de similar textura exhiben similares propiedades hidráulicas (Carsel y Parrish ,1988; Wösten *et al.*, 1995; Leij *et al.*, 1996; Wösten *et al.*, 1999). De ahí que, estas supuestas relaciones

estadísticas entre propiedades hidráulicas y textura del suelo no son fácilmente transferibles a otras zonas climáticas (Wösten *et al.*, 2001 y O'connell y Ryan, 2002).

Las funciones de pedotransferencia continuas se dividen a su vez en PTFs de puntos, PTFs semifísicas y PTFs paramétricas (Zacharias y Wessolek, 2007).

1. PTF de puntos: Los métodos basados estiman el contenido de humedad de selectos puntos de la curva a partir de predictores tales como los porcentajes de arena, limo, o arcilla, el contenido de materia orgánica o la densidad aparente (Ej. Gupta y Larson, 1979; Rawls y Brakensiek, 1989). Se destaca que, en esta aproximación se estiman los puntos de la curva asociados con la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Pidgeon, 1972; Lal, 1979; Aina y Periaswamy, 1987; Dijkerman, 1988; Pachepsky *et al.*, 1996; van der Berg *et al.*, 1997, Minasny *et al.*, 1999, Koekkoek y Booltink, 1999; Oliveira *et al.*, 2002), necesarios para las principales prácticas de manejo. En este método se explota el hecho bien conocido de que un grupo de propiedades básicas del suelo son más importantes en el rango húmedo de la CRHS, mientras otras propiedades controlan la variabilidad en el rango seco.

2. PTF semifísica: En este método la CRHS es derivada a partir de información relacionada con la distribución acumulativa del tamaño de partículas. Teóricamente, esta aproximación se basa en la similitud entre la distribución acumulativa del tamaño de partículas y la CRHS. Los contenidos de humedad se derivan a partir predictores del volumen de poros del suelo y el potencial a partir de relaciones capilares. El mismo requiere información detallada acerca de la distribución del tamaño de partículas, lo que limita su aplicabilidad práctica (Børgesen y Schaap, 2005). Adicionalmente, para la modelación de continuos escenarios del régimen de humedad del suelo, estos métodos requieren de la selección de un método adecuado para interpolar la curva de retención entre puntos muestreados, lo cual no resulta fácil de garantizar (Zacharias y Wessolek, 2007). Esta es la aproximación menos empleada en la práctica.

3. PTF paramétrica: El método de estimación de parámetros usa la regresión múltiple u otro método para derivar los parámetros de un modelo analítico de la CRHS, usando varios predictores (Vereecken *et al.*, 1989; Schaap y Leij, 1998; Wösten *et al.*, 1999; Minasny *et al.*, 1999; Minasny y Mcbratney, 2002). En esta aproximación se estiman los parámetros necesarios para estudios de modelación de flujo y transporte. Un serio inconveniente para su

aplicabilidad es que los parámetros muestran gran interdependencia entre sí y una alta no linealidad con las propiedades del suelo, resultando en ocasiones difíciles de estimar (Tietje y Tapkenhinrichs, 1993; Scheinost *et al.*, 1997; Merdun *et al.*, 2006).

1.4.2 Métodos lineales y redes neuronales

A partir de la literatura, se corrobora que los métodos de regresión lineal múltiple (Bell y Keulen, 1995; Wösten *et al.*, 1995; Batjes, 1996; Salchow *et al.*, 1996; Lin *et al.*, 1999; Mayr y Jarvis, 1999; Tomasella *et al.*, 2000; Merdun *et al.*, 2006; Baker y Ellison, 2008, Santra y Das, 2008, Lake *et al.*, 2009; Merdun, 2011) de conjunto con las redes neuronales (Tamari *et al.*, 1996; Schaap y Leij, 1998; Schaap *et al.*, 1998; Koekkoek y Bootink, 1999; Minasny y Mcbratney, 2002; Minasny *et al.*, 2004; Agyare *et al.*, 2007; Baker y Ellison, 2008; Sarmadian *et al.*, 2009) son los métodos más empleados para desarrollar PTFs. En los métodos de regresión lineal múltiple se emplean una cantidad de parámetros que es dependiente del número de puntos de la curva de retención medidos. En la literatura la mayoría de la PTFs reportadas son ecuaciones de regresión, las cuales han demostrado su habilidad para predecir el valor de las propiedades hidráulicas sobre una región con aceptable precisión comparado con sus costos de investigación (Romano y Palladino, 2002).

Las redes neuronales constituyen desde el punto de vista matemático herramientas más robustas que las técnicas de regresión, aunque no necesariamente más efectivas. Una de sus ventajas esenciales es que no requieren, a priori, de un modelo que relacione las entradas con las salidas, lo cual en general resulta difícil de conocer (Schaap y Leij, 1998). Ello en buena medida justifica su empleo y su mejor eficiencia cuando en ocasiones se le compara con los análisis de regresión (Minasny y Mcbratney, 2002; Amini *et al.*, 2005; Baker y Ellison, 2008, Akbarzadeh *et al.*, 2009; Lake *et al.*, 2009).

Este mejor comportamiento de las redes es válido, sobre todo, si se trata de la predicción de los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten (PTFs paramétricas). En contraste, varios autores hallaron buenos resultados con el empleo de análisis de regresión comparado con el método de redes neuronales (Koekkoek y Bootink, 1999; Ungaro *et al.*, 2005; Merdun *et al.*, 2006), cuando se aplican al desarrollo de PTFs de puntos.

En general, no existe un criterio absoluto acerca de qué método es mejor. En muy pocas ocasiones se compara el comportamiento de ambos procedimientos en el desarrollo

simultáneo de funciones (Pachepsky *et al.*, 1996; Koekkoek y Booltink, 1999; Minasny *et al.*, 1999; Ungaro *et al.*, 2005; Merdun *et al.*, 2006).

1.4.3 Variables de entrada de las PTFs

Es destacable que la mayoría de las PTFs disponibles en la literatura han sido derivadas y probadas en suelos de regiones templadas (Tomasella y Hodnett, 2005). En este sentido, los mayores esfuerzos han estado dirigidos a desarrollar relaciones empíricas para un conjunto particular de datos (Ej. Rawls *et al.*, 1982; Vereecken *et al.*, 1989; Leij *et al.*, 1996; Wösten *et al.*, 1999; Minasny *et al.*, 1999) lo que ha dificultado la extensión de estos métodos en disímiles condiciones. Según Bastet *et al.* (1999), las PTFs pueden ser empleadas con confianza solo dentro de restringidos rangos de suelos y condiciones ambientales. Esto en buena medida determina que estas relaciones más difundidas carecen de valor práctico en el trópico.

La falta de datos relacionados con la curva de retención constituye la principal restricción en el desarrollo de PTFs en los países tropicales. Al respecto, solo se reportan unas pocas funciones que involucren suelos del trópico (van den Berg *et al.*, 1997; Tomasella *et al.*, 2000; Hodnett y Tomasella, 2002).

Otra problemática no menos importante lo constituyen las variables que participan en las estimaciones. Las PTFs hidráulicas más difundidas a nivel mundial se basan en el empleo de la textura (partiendo casi siempre del esquema de la USDA), la materia orgánica y la densidad aparente del suelo, como variables independientes de estos modelos. En las regiones templadas los suelos con más del 60 % de arcilla son, generalmente, considerados de baja permeabilidad y desestimados desde el punto de vista agrícola (Carsel y Parrish, 1988). En contraste, es común encontrar en los suelos del trópico contenidos de arcillas en el rango entre 60 y 90 %.

En adición a ello, está ampliamente documentado en la comunidad científica que dos suelos con niveles similares del contenido de arcilla pueden mostrar diferente comportamiento desde el punto de vista hidráulico. En el trópico es común encontrar suelos arcillosos, sobre todo aquellos donde la arcilla predominante es del tipo 1:1, con un comportamiento de retención hídrica que nada tiene que ver con los suelos arcillosos de clima templado (Tomasella y Hodnett, 2005). Por lo tanto, es importante considerar, además de la textura, la propia mineralogía de la fracción arcilla.

Por otra lado, gran parte de los estudios más difundidos relacionados con la temática incluyen suelos con altos contenidos de materia orgánica (van der Berg *et al.*, 1997). En cambio, la mayoría de los suelos tropicales son bien drenados, fuertemente intemperados y con relativamente bajos contenidos de materia orgánica (MO). Dexter *et al.* (2008) ha hecho notar que en suelos con muy elevados contenidos de MO la arcilla se convierte en un factor limitante para el mejoramiento de la estructura, en tanto en aquellos con muy baja MO, es la propia MO el factor limitante.

Si bien es cierto que la MO y la densidad aparente califican como indicadores de la estructura del suelo, al menos de manera indirecta (Lilly *et al.* 2008), las PTFs más universales asumen que estas dos variables son capaces de cuantificar de manera absoluta el efecto de la estructura en las propiedades hidráulicas. Una explicación del limitado alcance de las PTFs es que la relación entre estructura y función no están lo suficientemente bien representada y como resultado estas no son capaces de describir por sí solas la estructura de poros (Pachepsky *et al.*, 2006).

La problemática que se deriva de la extensión de PTF más generales se agudiza aún más en el caso de Cuba, donde numerosos estudios demuestran que nuestros suelos muestran propiedades inusuales incluso cuando se les compara tratándose de algunos de su tipo en el trópico (Ascanio, 1973; Ortega, 1983; Ortega, 1984; Bosch *et al.*, 1984; Rivero, 1985; Bouza *et al.*, 1985; Otero *et al.*, 1986; Delgado, 1987; Febles, 1988; Ministerio de la agricultura, 2001; Vega, 2006; Febles *et al.* 2009).

Es por ello que recientes esfuerzos han estado dirigidos a la obtención de mejores PTF mediante la incorporación de nuevas variables predictivas tales como la inserción de variables del terreno (Palladino, 2000; Romano y Palladino, 2002; Santra y Das, 2009), la resistencia a la penetración (Pachepsky *et al.*, 1998), la capacidad de intercambio catiónico y el pH (Hodnett y Tomasella, 2002), lo que se denomina en la literatura variables concomitantes, es decir el contenido de humedad a uno de los potenciales matriciales de la curva de retención (Rawls *et al.*, 1982; Ahuja *et al.*, 1985; Paydar y Cresswell, 1996; Børgesen y Schaap, 2005; Rajkai *et al.*, 2004) y la composición del tamaño de agregados (Pachepsky y Rawls, 2003).

Para Vereencken *et al.* (2010), el desarrollo de PTF está abocado de establecer bases de datos que sean derivadas a partir de procedimientos de medición armonizados y

estandarizados, que contengan nuevos predictores tales como propiedades de la estructura del suelo. Sin embargo, la mayoría de las PTFs han sido derivadas a partir de voluminosas bases de datos provenientes de diferentes sitios y campañas de campo llevadas a cabo con distintos propósitos, adoleciendo en general de un análisis espacial. De aquí que muchos estudios llevan a cabo un agrupamiento a priori, considerando uno o más criterios (suelos, horizontes, clases texturales, grado de la estructura u otros) como estrategia para minimizar la variabilidad resultante e incrementar la credibilidad y aplicabilidad de dichas funciones. Muy a pesar de ello, no es posible desarrollar una PTF universal porque el rango global de variación de las propiedades es mucho mayor que el de suelos (Tomasella y Hodnett, 2002).

1.5 Relación entre la CRHS y otras propiedades del suelo

El grado de retención de humedad es una función compleja de la estructura del suelo y de su composición (Rawls *et al.*, 1991; Wösten *et al.*, 2001). A continuación se analiza el nexo entre la CRHS y otras propiedades, no sin antes apuntar que resulta extremadamente difícil asociar el grado de retención al comportamiento individual de una determinada propiedad, es decir, sin tener en cuenta la interrelación entre estas.

1.5.1 Textura del suelo

El que la textura es determinante ya sea, directa o indirectamente, en la curva de retención de humedad, es un aspecto universalmente reconocido (Whittig y Allardice, 1986; Klute, 1986; Hillel, 1998; Lal y Shukla, 2004). Su implicación se manifiesta a través de varias propiedades y procesos relacionados. Un incremento de su contenido influye sobre varias propiedades del suelo como la porosidad total, el área de superficie específica, la capacidad de expansión –contracción, la adsorción y la plasticidad (Lal y Shukla, 2004).

Entre el tamaño de las partículas primarias del suelo y la superficie específica (área de las partículas por unidad de masa del material) existe una relación muy estrecha. A su vez, muchas propiedades físicas y químicas del suelo están relacionadas con esta área superficial, la cual en buena medida determina el grado de retención de humedad de los suelos a los más bajos potenciales matriciales.

Al mismo tiempo, el papel de la textura del suelo en la retención se asocia indirectamente con la estructura. Los suelos de textura más gruesa son generalmente menos estructurados y tienen menor capacidad de retención de humedad. La distribución de partículas primarias del suelo también determina los espacios de poros intra–agregados o texturales, los cuales

son relativamente estables (Or *et al.*, 2000). Como bien refleja la Figura 1.1 el rango más alto o húmedo de la CRHS está influenciado por factores más relacionados con la estructura y su rango más bajo o seco, por el área superficial de partículas del suelo. La textura pues influye en mayor o menor medida en todo el rango de potenciales.

Dentro de las fracciones texturales las arcillas son las de mayor interés por su gran carácter reactivo. Las partículas arcillosas forman los complejos órgano minerales, ya sea de forma directa (atracción electrostática), como indirecta (mediante elementos unificadores como el calcio). La mineralogía de las arcillas impone patrones sumamente variables en cuanto a la retención de humedad de los suelos. Para que se tenga una idea, el área por unidad de masa de una montmorillonita pura es más de 40 veces la correspondiente a una caolinita pura (Hillel, 1998). Ello conlleva a que en el análisis de la variabilidad de las curvas de retención, sobre todo en suelos tropicales, tenga un peso fundamental tanto la cantidad como el tipo de arcilla predominante.

1.5.2 Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica (MO) influencia numerosas propiedades y procesos del suelo debido a su área de superficie, su alta densidad de cargas y su afinidad por el agua. La mayoría de los atributos del suelo están relacionados con la materia orgánica (estabilidad de los agregados, resistencia a la erosión, disponibilidad de nutrientes, capacidad de intercambio, infiltración, retención de humedad, y otros).

El papel de la MO del suelo en la capacidad de agua disponible ha sido ampliamente documentado (Hudson, 1994; Pradeep y Brushan, 2001; Lal y Shukal, 2004; Blanco-Canqui y Lal, 2007; Abid y Lal, 2008). En suelos bajo cultivo intenso la rápida oxidación de la materia orgánica causa el deterioro de las propiedades físicas (Shang y Tiessen, 2003) y el declive de la estructura del suelo (Lal y Shukal, 2004).

La materia orgánica puede soportar hasta 20 veces su peso en agua, pudiendo afectar los procesos relacionados con la retención de manera directa o indirecta a través de sus efectos sobre la estructura del suelo (Klute, 1986; Dick y Gregorich, 2004). La estrecha relación entre la MO y la estructura hace que esta propiedad intervenga principalmente en el rango húmedo de la curva de retención (Smith, 1985; Zacharias y Wessolek, 2007).

Bouza *et al.* (1985) reportan que en los suelos Ferralíticos existen una cantidad notable de las fracciones finas en estado disperso que pueden moverse a través de los macro poros

hacia las capas inferiores durante los periodos de fuertes lluvias. Estos autores explican este fenómeno, al parecer contradictorio dado el mayor contenido de materia orgánica existente en la parte superior del suelo, por el tipo y calidad de los constituyentes orgánicos, específicamente asociándolo a los ácidos fúlvicos predominantes de estos suelos (Ortega, 1985).

En tanto, Orellana *et al.*, (1986) constataron la existencia de una relación significativa entre el tamaño de los agregados y la pérdida de la estabilidad hídrica de los mismos cuando se extraen de ellos los compuestos orgánicos apolares del humus.

No obstante, el nexo entre el contenido de materia orgánica y la agregación del suelo muchas veces difiere de un estudio a otro a nivel mundial (Lal y Shukla, 2004). Según estos autores obedece a factores tales como: (i) solo una parte del contenido orgánico presente es responsable de la agregación, como es el caso de los suelos con alto contenido de materia orgánica, (ii) existe un límite crítico o valor umbral de su contenido por encima del cual esta no afecta la agregación, (iii) la agregación es afectada por un constituyente orgánico específico, (iv) existen otros mecanismos agregantes, los cuales son mejores o más efectivos y (v) la agregación y la estabilidad de agregados son afectados por otros factores pedológicos o antrópicos.

De manera análoga a como sucede con el tipo de arcillas, no solo la cantidad de MO puede influir en la retención, sino además su calidad. La materia orgánica humificada, dependiendo de la fracción predominante, puede variar la carga superficial, el área superficial activa, la propiedad de adsorción de agua y las características expansivas de la arcilla, transfiriéndole al suelo mayor capacidad de intercambio catiónico, granulación, estructuración y capacidad de retención.

Gran parte de los modelos de simulación actuales (Coleman y Jenkinson, 1999) reconocen cinco grupos principales de materia orgánica: la húmica, la biomasa microbiana, la lábil, la químicamente protegida y la pasiva o inerte. De ellos, el grupo de la materia orgánica húmica y la biomasa microbiana son de particular interés en la agregación. El de la masa microbiana está implicado en la formación inicial de los agregados, mientras el de la húmica juega un rol importante en la perdurabilidad de los agregados (Tisdall y Oades, 1982; Tisdall. 1996; Krull *et al.*, 2004). Ortega (1985) brinda una información generalizada acerca de la composición

fraccional del humus de los principales suelos de Cuba, los cuales en muchos casos difieren de sus similares de otras regiones del planeta.

1.5.3 Densidad aparente

La densidad aparente es una propiedad básica de suelo, empleada como un indicador de la porosidad y la compactación. Su incremento es un rasgo común de los suelos agrícolas y ocurre para una variedad de escalas y como resultado de procesos naturales y perturbaciones antrópicas, siendo estas últimas las causantes de las más severas degradaciones.

La Da figura entre las propiedades del suelo que más afectan las propiedades hidráulicas y los procesos relacionados (Strudley *et al.*, 2008). Tormena y Silva (2002) encuentran que las variaciones en la retención de humedad se deben fundamentalmente a la densidad aparente. Para Assouline (2006), el rápido incremento de la densidad aparente debido al movimiento relativo de los agregados del suelo, reforma la distribución del tamaño de poros y, consecuente, la CRHS. Según Abid y Lal (2009), en suelos bajo manejos convencionales y cultivación continua se afecta la característica de transmisión de agua, debido a que experimentan una tendencia a la disminución del número poros con el transcurso del tiempo en la capa arable.

Los poros estructurales o inter-agregados son los más vulnerables a los efectos de la compactación y por ende a un cambio en la densidad. Esos poros están determinados por la posición, orientación y forma de unos agregados relativos a otros y se asocian a un rango de retención entre saturación y el límite superior del agua disponible (Or *et al.*, 2000). Cuando un suelo es compactado su porosidad estructural es destruida, resultando en una ganancia de poros texturales, modificando la curva de retención de humedad y, por ende, la disponibilidad de agua. Ello conlleva a una disminución de la humedad retenida a los potenciales más altos y un incremento a los potenciales más negativos (Richard *et al.*, 2001).

1.5.4 Estructura del suelo

La estructura del suelo es un factor primordial en la retención hídrica, pero extremadamente complejo de caracterizar. La estructura varía grandemente en espacio o tiempo como consecuencia de procesos naturales, el manejo, los ciclos de humedecimiento y secado la biología del suelo. Baste pensar en el sinnúmero de posibles arreglos en que se pueden

combinar las partículas de un suelo para dar lugar a una determinada configuración estructural.

El origen de la estructura parte de dos principios fundamentales: floculación y cementación. Los agregados del suelo son, por lo general, típicos de suelos ricos en arcilla y materia orgánica y son cruciales para el movimiento y transporte de agua, gas o solutos. Los mismos mejoran la aeración, infiltración y el almacenaje de agua. A su vez, reducen la evaporación, la escorrentía y la erosión.

Los dominios inter e intraagregados ejercen una fuerte influencia en el comportamiento de retención de suelos agregados en todo el rango de potenciales matriciales. Bajo condiciones cercanas a saturación, los grandes poros inter-agregados constituyen vías preferenciales para la rápida infiltración del agua. Tales condiciones solo prevalecen durante intensas entradas de agua. Una vez drenados los grandes poros, el agua es redistribuida lentamente en el dominio de microporos intra-agregados.

Es de destacar que, el funcionamiento hidráulico de la región inter e intraagregada es a su vez extremadamente dependiente de factores como la porosidad, la permeabilidad y la composición química de los agregados (Carminati *et al.* (2008). De acuerdo con Lynch y Braga (1985) y Quirk y Murria (1991), en suelos donde las partículas están agregadas, el diseño y la perdurabilidad del espacio poroso depende en gran medida de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados, influenciando el movimiento y la disponibilidad del agua y el aire. Según Lipiec *et al.* (2007) el movimiento de agua y solutos en suelos agregados dependen marcadamente de las propiedades hidráulicas de los agregados del suelo, tales como conductividad, infiltración, sortividad y retención.

Aunque el papel crucial de la estructura en las propiedades hidráulicas es ampliamente reconocido (Guber *et al.*, 2003), pocos trabajos publicados incorporan indicadores de esta variable en la estimación de la curva de retención de humedad a partir de otras propiedades del suelo (Rawls *et al.*, 1991; Pachepsky y Rawls, 2003; Guber *et al.*, 2003). De acuerdo con Lilly *et al.*, (2008), no existe una recomendación clara de cuáles indicadores de estructura pueden tener un efecto significativo en la estimación de dichas propiedades, debido sobre todo a que la mayoría de los indicadores de esta variable en las bases de datos son morfológicos.

Lo que resulta claro es que no basta solo con considerar el estado de agregación de un suelo, se debe tener en cuenta además cómo están distribuidos sus agregados. En uno de los pocas aplicaciones de este tipo Pachepsky y Rawls (2003) emplean la distribución del tamaño de agregados como indicador cuantitativo de la estructura y arriban a que los pequeños agregados del suelo (< 1 mm) y los grandes (> 7 mm) son las fracciones más fuertemente correlacionadas con la curva de retención de humedad.

1.5.5 Capacidad de cambio de bases

El conocimiento de la capacidad de cambio de bases y la distribución de cationes de las superficies de intercambio puede ser usada como poderosa herramienta para la caracterización y, especialmente, la cuantificación de las arcillas minerales, el origen y la génesis de los suelos (Dohrmann, 2006). En suelos con bajos contenidos de MO, la CCB puede ser empleada como un estimador de la mineralogía de la arcilla (Bruand *et al.*, 2004). El estrecho vínculo entre la capacidad de intercambio y el tipo de arcilla condiciona a su vez la relación con el grado de retención de la humedad del suelo (Arrouays y Jamagne, 1993; Tessier *et al.*, 1999; Packepsky y Rawls, 1999; Hodnett y Tomasella, 2002).

Dentro de las bases intercambiables o absorbidas del suelo se destacan el contenido de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). El calcio ejerce su influencia a escala del complejo órgano-mineral (Six *et al.*, 2004), siendo su influencia mayormente observada a nivel de micro-agregados (Grant *et al.*, 1992; Baldock *et al.*, 1994). Ambos cationes bivalentes mejoran la estructura del suelo a través de la fortaleza del enlaces de sus cargas con las partículas de arcilla que influyen en la estabilidad (Bronick y Lal, 2005) y consecuentemente en su capacidad de retención de humedad.

El sodio Na^+ , en cambio, es un elemento altamente dispersante, ya que favorece la ruptura de los agregados de suelos. La relación entre el contenido de calcio y el de sodio, a través de la Tasa de Adsorción del Sodio (SAR), es uno de los elementos indispensables en la planificación del riego en la agricultura de cualquier país. A mayor contenido relativo de sodio se requiere un mayor lavado de los suelos.

1.6 La curva de retención de humedad en suelos de Cuba

Un estudio de los antecedentes más importantes en lo que respecta a la determinación de las propiedades hidráulicas de los suelos en Cuba fue llevado a cabo por Ruiz y Medina (2003). A decir de estos autores, la determinación de la curva de retención de humedad

°1. Conceptos Base...

comenzó en la década de los setenta con la introducción, en el Instituto de Suelos, de una olla Richards; todas las curvas determinadas en este período se realizaron a partir de muestras alteradas. Con la adquisición en la década de los ochenta de una caja de arena en el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), en el marco de un proyecto FAO, es que se inician los estudios a partir de muestras inalteradas.

En este documentado estudio se reflejan no solo los aspectos inherentes a las CRHS como tal, sino también a los métodos empleados, prevaleciendo aquellos por vía directa. Según sus autores hasta el 2003 solo se reportaban 176 determinaciones por esta vía empleando muestras inalteradas. Relativamente poco se ha hecho desde esa década hasta la actualidad, sin desconocer los valiosos esfuerzos en este campo de distintos grupos científicos pertenecientes a la UNAH, el IIRD, el Instituto de Suelos y otros.

Entre los principales trabajos relacionados con la determinación de la CRHS in situ se hallan los de Carrillo (1980) y Ruiz *et al.* (1992) empleando para estos fines el tensiómetro. Estos últimos de conjunto con Bouza *et al.* (1985), Ruiz y Utset, (1992), Herrera *et al.* (1985), Cid (1992) y Ruiz (1998) emplean la caja de arena y la olla Richards usando tanto muestras alteradas como inalteradas.

En el empleo de los métodos indirectos de determinación de la curva solo se tiene conocimiento de dos trabajos publicados (Medina *et al.*, 2002 y Millán y González-Posada, 2005). En el primero de ellos se evalúan varias de las PTFs más citadas en la literatura a partir de información recopilada de 15 perfiles de suelos Ferralíticos Rojos del occidente de Cuba, demostrando en todos los casos su baja capacidad de predicción de la curva de estos suelos. En el segundo se emplea la teoría fractal para estimar datos de la CRHS, destacándose que solo 2 de las 21 curvas empleadas en su implementación son inherentes a los suelos de Cuba.

En un esfuerzo conjunto, varias instituciones científicas del país (Universidad Agraria de La Habana, Centro de Hidrológica y Calidad de las Aguas e Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje) llevaron a cabo un proyecto dirigido a recopilar y centralizar la información relacionada con las propiedades hidráulicas de los suelos de Cuba, medida a lo largo de décadas. En su realización se evidenció que gran parte de la información disponible estaba incompleta, no geo-referenciada, en su inmensa mayoría en formato analógico y en apreciable estado de deterioro por el paso del tiempo.

Por otra parte, es de destacar que en los momentos actuales son contadas las instituciones científicas del país que disponen del equipamiento de laboratorio necesario para la determinación de la CRHS. Dentro de los numerosos centros científicos del occidente de Cuba relacionados con el estudio de los suelos solo la Universidad Agraria de La Habana y el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD) están en capacidad de realizar determinaciones sistemáticas de esta propiedad.

De lo anterior se infiere las serias limitaciones tanto en lo que respecta a la determinación directa de la CRHS como en lo relacionado a la evaluación de métodos indirectos que permitan estimar estas relaciones.

1.7 Características generales de los suelos de Artemisa y Mayabeque

En este epígrafe se describen los principales agrupamientos de suelos representados en la región, basado en la II Clasificación Genética de los suelos de Cuba (Instituto de Suelos, 1975). Los mismos se abordan en el orden que indica su predominio en el territorio y que resultan de interés a los efectos de este trabajo de tesis.

1.7.1 Principales agrupamientos de suelos

Los suelos de mayor predominio en el territorio pertenecen al agrupamiento **Ferralítico**, los cuales se distribuyen, fundamentalmente, en las áreas más llanas (pediplanos cársicos) de la Llanura Roja Habana – Matanzas y en áreas muy estables de las partes altas de las elevaciones de La Habana – Matanzas y del grupo Bejucal – Madruga – Coliseo (planicies altas).

En sentido general son suelos profundos con predominio de minerales arcillosos del tipo 1:1, pudiendo representar los del tipo 2:1 el 10% del contenido total de la fracción arcillosa, bien aireados, perfil completo (ABC), derivados de calizas duras y generalmente cavernosas. Existen también ínterestratificaciones del tipo caolinita-esmectita (Shishov *et al.*, 1973; Gradusov *et al.*, 1976), además de metahalloisita y caolinita y contenidos menores de goethita, hematina, gibbsita y trazas de cuarzo (Obregón, 1979; Camacho, 1980; Bosch, 1981). Los Ferralíticos de las llanuras cársicas se han formados sobre rocas calizas, aunque existen algunos formados a partir de eluvio y deluvios-proluvios de serpentina, solo en la cercanía de esta últimas (Bosch *et al.*, 1984).

Se consideran de pH natural ligeramente ácido, aunque muestran una tendencia actual a la alcalinización (Bosch *et al.*, 2001; Cancio, 2002; Hernández *et al.*, 2006; Jonh *et al.*, 2009).

°1. Conceptos Base...

Se caracterizan además por ser medianamente saturados por bases alcalinotérreas, de alto grado de evolución debido a su menor erosión actual y pretérita, razón por la que los contenidos de hierro libre (Fe_L / Fe_T) son siempre mayores de 60 % y la CIC es menor de 20 $cmol\ Kg^{-1}$ (determinada en arcilla). En las condiciones actuales estos suelos, a pesar de estar sometidos a un régimen de lluvias intenso, se encuentran más saturados que otros de su tipo en otras regiones del planeta (Ascanio, 1973; Ortega, 1983; Rivero, 1985; Otero *et al.*, 1986). La presencia de minerales inter-estratificados, puede también explicar el por qué de los valores tan elevados de la capacidad cambio de bases y catiónica en suelos donde la fracción arcillosa está constituida fundamentalmente por minerales tipo 1:1.

Estos suelos se distinguen por presentar una buena estructura para el laboreo agrícola y una fertilidad relativamente alta. El carácter de estos suelos está dado principalmente por su alto grado de estructuración, de agregados con alto valor agronómico y estables en agua, favorecido por la presencia de óxido de hierro y el calcio (Rivero y Agafonov, 1978, Camacho, 1980), pero influyen también los contenidos de humus (Delgado, 1987). De acuerdo a Orellana *et al.* (2008) se requiere un contenido de MO no menor del 3.5 % para garantizar un 60 % agregados hidroestables, que coadyugan al buen funcionamiento de los suelos Ferralíticos Rojos del occidente cubano.

En ellos tiene lugar un fenómeno muy singular, descrito por Bouza *et al.* (1985), en el cual en períodos de prolongadas sequías, la humedad desciende muy lentamente a partir de 80 % de la capacidad de campo. Según estos autores, las investigaciones realizadas demuestran que este es el límite a partir del cual se rompen los enlaces capilares en los suelos Ferralíticos. A partir del mismo, las pérdidas de humedad se producen fundamentalmente por transpiración, ya que el movimiento capilar se ve interrumpido y la evaporación física solo ocurre a expensas de los vapores de agua que se difunden a través de los poros del suelo.

En general, son poco densos a pesar del predominio de minerales pesados en su composición (Bouza *et al.*, 1985). Presentan un buen drenaje, por lo que gran parte del agua se pierde hacia los horizontes más profundos (Rivero, 1985), mostrando coeficientes de infiltración que alcanzan valores de hasta 140 mm/h en el subtipo Típico (Delgado, 1987). Las microdepresiones del relieve cársico es uno de los elementos esenciales en la distribución de los suelos Ferralíticos (Camacho *et al.*, 1985). Los pertenecientes a las llanuras cársicas experimentan como sus principales modalidades la erosión hídrica y la cársica – erosiva (Febles, 1998; Vega, 2006; Febles *et al.* 2009).

°1. Conceptos Base...

Los suelos Ferralíticos Rojos (subtipos *Típico, Compactado e Hidratado*) y Ferralíticos Amarillentos (*Típico, Concrecionario y Gleyzoso*) constituyen, por ese orden, los tipos genéticos predominantes de este agrupamiento dentro de la provincia. También están representados en menor medida por los tipos *Ferralítico Rojo Lixiviado, Ferralítico Cuarácítico Amarillo Lixiviado* y *Ferralítico Cuarácítico Amarillo Rojizo Lixiviado*.

En segundo lugar, en cuanto a su predominio, aparece el agrupamiento de los suelos **Pardos** asociados fundamentalmente a rocas de tipo terrígeno – carbonatadas y carbonatado – terrígenas (margas, calizas margosas) y en menor grado a rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Su distribución coincide en gran medida con relieves de llanuras altas onduladas o ligeramente onduladas, en las cuales, los suelos se han formado por un proceso de intemperismo tropical de tipo Sialítico, en los que el proceso de evolución ha estado frenado por distintos grados de erosión (actual y pretérita) y por un proceso edáfico denominado de autofrenaje.

La composición mineralógica de los suelos Pardos es variada y está relacionada con el tipo de roca madre, la cual puede ser una porfirita, una roca básica o una calcárea. En la fracción gruesa los minerales pesados están representados por anfíboles, piroxenos y epidotas; la fracción ligera por plagioclasas, hidróxidos de hierro, alteritas y un contenido de cuarzo que varía según el tipo de roca.

En sentido general, se caracterizan por ser suelos carbonatados o saturados por bases alcalinotérreas, prevaleciendo el calcio en el complejo de intercambio y con capacidad de intercambio catiónico (CIC) generalmente superior a 30 cmol kg^{-1} . Se caracterizan por el predominio de minerales arcillosos del tipo 2:1 en la fracción arcillosa. El contenido de hierro libre en relación al hierro total ($\text{Fe}_L / \text{Fe}_T$) es menor de 40 %. El contenido de materia orgánica por lo general es medio (2.0 – 4.0 %). El pH en condiciones naturales es generalmente neutro a ligeramente alcalino. Son suelos de estructura terronosa, relativamente poco estables en superficie y masiva y dura en estado seco.

Los suelos pardos, en particular aquellos pertenecientes a las provincias de Artemisa y Mayabeque, han sido menos estudiados desde el punto de vista hidráulico. No obstante, de ellos se sabe por las características de la mineralogía que son suelos que poseen una elevada capacidad de retención hídrica y un drenaje limitado.

°1. Conceptos Base...

En la provincia se identifican los tipos *Pardo sin Carbonato*, *Pardo con Carbonato* y *Pardo Grisáceo*, estando en todos los casos representado por el subtipo *Típico*. En su conjunto, estos dos agrupamientos descritos constituyen los suelos de mayor importancia agrícola en el territorio, dada por sus características agroproductivas (desde medianamente productivos hasta muy productivos) y por su distribución geográfica.

Por ese orden, luego aparece el agrupamiento **Húmico Calcimórfico**, en el cual el *Húmico Carbonático* (Rendzina Negra) y la *Rendzina Roja*, subtipos *Típicos*, son los más representados. En ellos predomina el proceso de humificación favorecido por la presencia de grandes cantidades de calcio activo y de arcillas. Se desarrollan sobre rocas calizas y presentan perfiles A-C, A-AC-C o A-(B)-C donde el horizonte B no está bien definido. Son suelos saturados, más del 90 % del complejo de absorción está ocupado por el calcio, seguido por el magnesio. El contenido de materia orgánica del horizonte A es elevado, confiriéndole un color oscuro. Este contenido favorece la formación de una estructura granular a nuciforme muy estable. El pH es mayor de 7 y la relación ácido húmico / ácido fúlvico (H/F) es igual o algo mayor de 1.

A los suelos Húmicos le siguen los del agrupamiento **Fersialíticos**, los que se forman bajo el proceso de sialitización, acompañado por la ferruginación, siendo característico la formación de minerales arcillosos del tipo 2:1 o mezcla de 2:1 y 1:1. Estos suelos son de una naturaleza químico-mineralógica muy disímil. Los suelos *Fersialíticos Pardos Rojizos (Típicos)* y los *Fersialíticos Rojo Parduzcos Ferromagnesiales* son los tipos y subtipos más representados de este agrupamiento. Los primeros se forman a partir del eluvio de rocas calizas duras o rocas efusivas y los segundos se asemejan por sus características a los suelos *Pardos con Carbonatos*.

Los suelos **Oscuros Plásticos** (Vertisoles) se ubican en diferentes elementos del relieve, tanto en condiciones hidromórficas como automórficas, principalmente en llanuras litorales y fluviales. Estos suelos se derivan de materiales aluviales antiguos o de aluvios-deluvios de rocas carbonatadas y depósitos marinos arcillosos. Su formación está relacionada con un intenso arcillamiento del perfil en un medio hidromórfico antiguo o semi-hidromórfico. Sobre este espesor arcilloso se presenta una tendencia al desarrollo de estructuras de bloques prismáticos grandes o medianos con caras de deslizamiento, que se manifiesta claramente en la época de sequía, conjuntamente con el agrietamiento marcado del suelo. Lo anterior

°1.Conceptos Base...

indica que los minerales secundarios de estos suelos son fundamentalmente heredados y no de neoformación.

Los suelos del agrupamiento **Ferrítico** presentan una alteración intensa de los minerales primarios y un elevado contenido de sesquióxidos de hierro (mayor del 50%). Dentro de la provincia existe el tipo *Ferrítico Púrpura Típico*, los cuales ocupan una pequeña área de sólo 1.4 km², limitada a bloques de serpentinita de los alrededores del municipio de Madruga (Jaimez *et al.*, 2004).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio seleccionada en este trabajo se corresponde con los límites de la antigua provincia La Habana. Esta región se localiza en la parte oeste de Cuba, entre los 22° 85' y los 23°15' de latitud norte y entre los 81°35' y los 83°00' de longitud oeste. Su superficie total es de 5731 km² y su población absoluta en torno a los 701 800 habitantes, confiriéndole, al momento de entrar en vigor la nueva división político-administrativa de 2011, el duodécimo lugar por su extensión (5,2 % del área total de Cuba) y el octavo por su población.

Desde el punto de vista de su caracterización geólogo-geomorfológica, la región proviene principalmente del Secundario (cretácico) en el norte, del Terciario (Paleógeno-Neógeno) en el centro y del Cuaternario en el sur. La Figura 2.1 muestra el mapa geológico de las antiguas provincias La Habana y Ciudad Habana. Atendiendo a la disposición del relieve (Figura 2.2), puede dividirse en dos áreas: la norte, de relieve ondulado, donde se encuentran las alturas de Bejucal- Madruga-Coliseo (al centro), la de Habana-Matanzas (porción nororiental) y las del Mariel (porción noroccidental), y la sur, eminentemente llana, dominada por la Llanura Cársica Meridional Habana-Matanzas y principalmente dedicada a la agricultura. En el extremo sur la costa es baja y pantanosa, destacándose el gran golfo de Batabanó y la ensenada de La Broa.

El clima se considera como tropical de humedad alternante, con un período largo lluvioso que se extiende de mayo a octubre y un período seco. La media histórica anual de precipitaciones (período comprendido 1961-2000) es de 1399 mm (INRH, 2006), la temperatura media de 24 °C y la humedad atmosférica relativa media es del 80 %. Al igual que en muchas otras zonas del país en la región se verifica un notable incremento en la recurrencia de prolongadas sequías, causando severos desequilibrios hidrológicos. Esto último constituye un fenómeno acumulativo y su efecto se refleja en el agotamiento de los recursos hídricos, de difícil recuperación en un corto plazo de tiempo (INRH, 2006).

Sus cuencas hidrográficas, que ocupan el 80% del área total de la provincia, desempeñan un papel importante en el abastecimiento de agua a la agricultura, y constituyen una fuente determinante en el abasto de la capital del país. Entre sus ríos más importantes se destacan el Ariguanabo, el Almendares y el Mayabeque, siendo sus aguas embalsadas en numerosas presas y micropresas con una capacidad superior a los 452.000.000 m³.

Según se reseña en el epígrafe 1.6, desde el punto de vista edafológico en la provincia aparecen representados los principales tipos y subtipos de suelos reconocidos en Cuba (ver Figura 2.3). De ellos, los suelos Ferralíticos Rojos constituyen el 57 % de la superficie agropecuaria de la provincia,

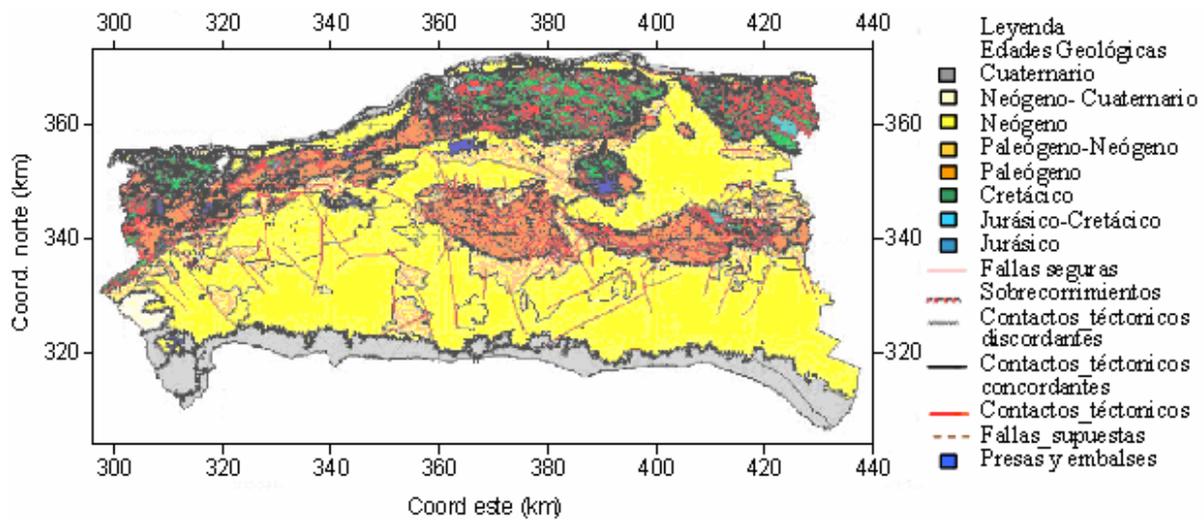


Figura 2.1. Mapa geológico de la antigua La Habana y Ciudad Habana (Campos et al., 2004).

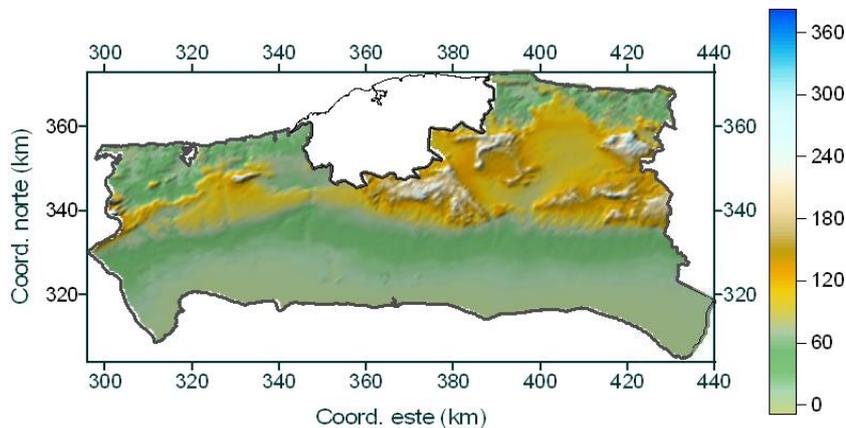


Figura 2.2. Mapa digital de elevación de la antigua provincia La Habana.

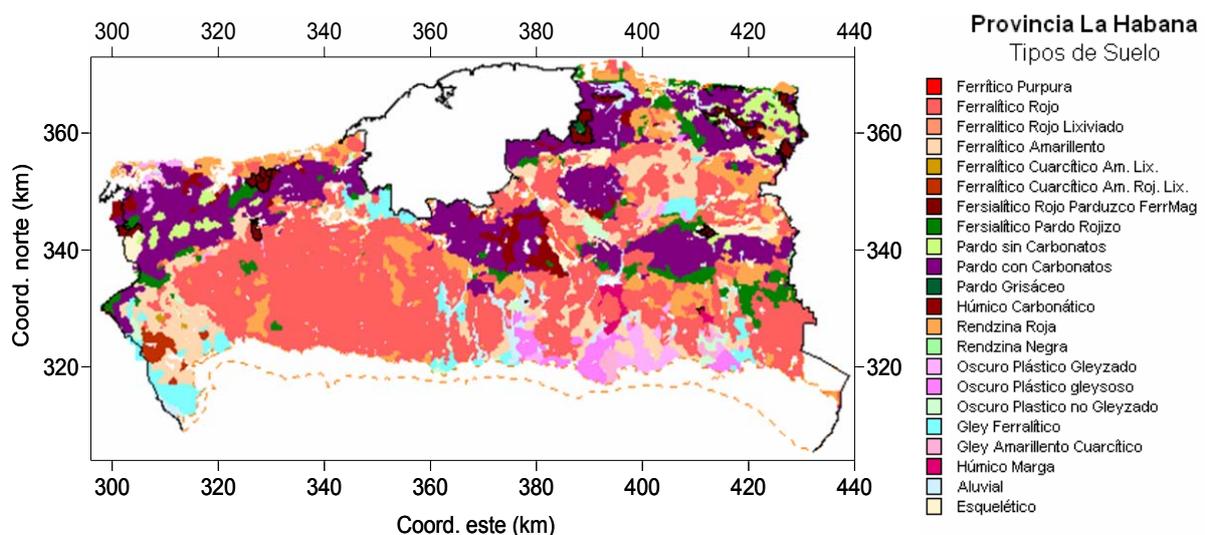


Figura 2.3. Mapa de Suelos de la antigua La Habana¹ a escala 1: 25 000.

¹ Digitalizado por el Instituto de Suelos a partir del Mapa Nacional de Suelos Escala 1: 25 000 (Paneque et al., 1991)

sustentando el mayor peso en la producción intensiva de alimentos para la población (Dueñas *et al.*, 2002). De la región proviene alrededor del 30 % de la producción agrícola del país, con particular destaque para la horticultura, la caña de azúcar, la papa y el tabaco.

2.2 Diseño experimental

Este estudio se basó en un muestreo intensivo de la curva de retención de humedad del suelo y varias de las principales propiedades físicas, químicas y fisico-químicas de la región. Para la selección de los puntos muestrales en el área de estudio se aplicó un muestreo sistemático estratificado no alineado, que combina las ventajas de una rejilla regular y la aleatorización (Webster y Oliver, 1990). Según estos propios autores el diseño es superior a métodos análogos en aplicaciones geoestadísticas, en tanto considera un amplio rango de distancias entre pares de puntos y al mismo tiempo toma en cuenta toda el área de interés. Con este fin se superpuso una rejilla regular principal con 150 nodos (Figura 2.4), conformada por celdas de 9.6 km de largo por 4 km de alto. El largo y alto de las celdas satisfacen el propósito de conservar las mismas proporciones relativas a las dimensiones de la provincia (asumiendo que esta se asemeja, *grosso modo*, a un rectángulo de 120 km de ancho por 50 de alto).

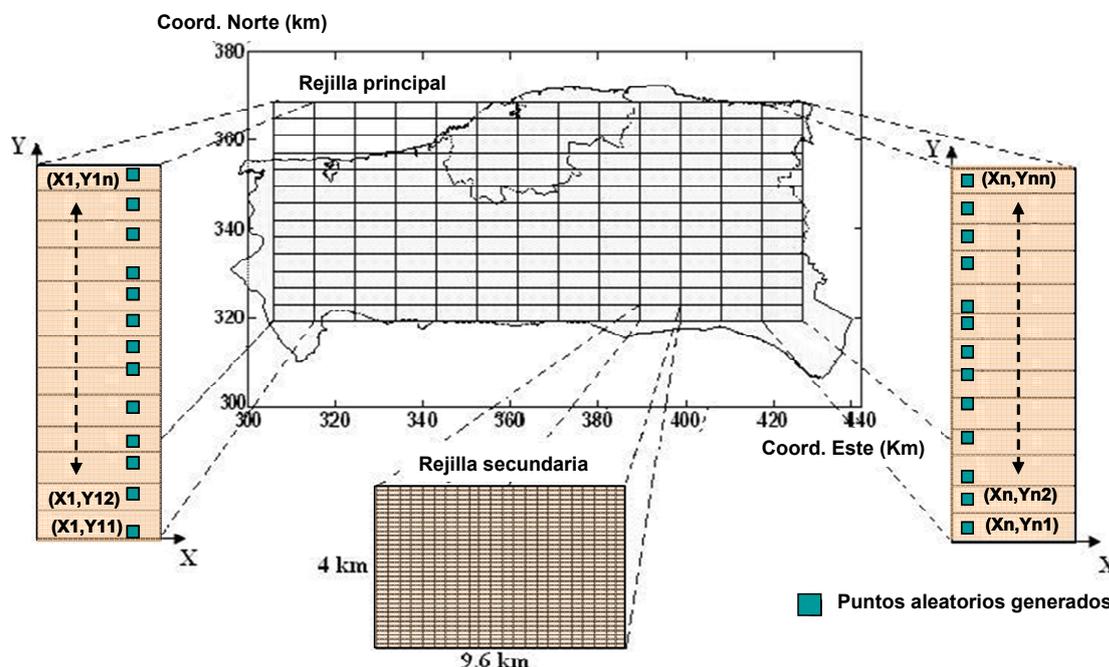


Figura 2.4. Esquema del diseño experimental planteado. Una rejilla regular principal con 150 nodos permitió estratificar la región, mientras una rejilla secundaria de 200 columnas y 200 filas en cada celda (de 9.6 km de ancho por 4 de alto) de la rejilla principal permitió delimitar los puntos. Para una misma columna la posición de cada punto es el resultado de seleccionar un valor de la coordenada X fijo para toda esa columna y un valor de Y variable para cada celda que la conforma, seleccionados ambos aleatoriamente.

De acuerdo con lo establecido por el método de diseño experimental la localización de los puntos de muestreo es el resultado de seleccionar para cada subconjunto de celdas que conforma una columna, un valor de la coordenada X fijo, para toda esa columna, y un valor de Y variable para cada celda de la misma (ver Figura. 2.4). Tanto el valor de X como los de Y se obtuvieron mediante generación aleatoria de números entre 1 y 200, a partir del esquema de subdivisión secundario. Note, como bien se muestra en la propia figura, que la posición relativa de la coordenada X será también variable entre columnas.

En aquellos casos en que el uso del suelo impedía la realización del muestro se obtuvo una nueva localización dentro de la propia celda de la rejilla principal, usando el mismo procedimiento. Se decidió no incorporar puntos de muestreos en áreas pertenecientes a los municipios de Mariel y Santa Cruz del Norte debido a que su actividad económica principalmente se desarrolla en el sector industrial. Tampoco se incluyó la franja costera del sur de la provincia, por carecer de relevancia desde el punto de vista agrícola. Finalmente se eligieron 116 puntos de muestreo en la región, cuya localización se muestra en la Figura 2.5. Los mismos pertenecen a los agrupamientos de suelos Ferralíticos (82), Fersialíticos (4), Pardos (18), Húmicos Calcimórficos (7) y Oscuros Plásticos (5).

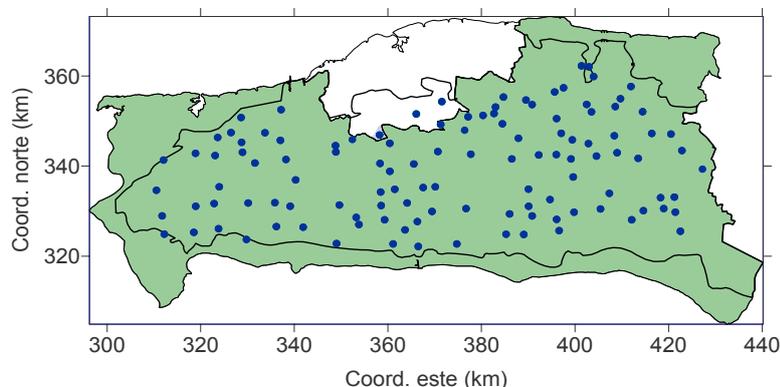


Figura 2.5. Distribución de los 116 puntos de muestreo seleccionados como resultado del diseño experimental planteado en la región de La Habana.

2.3 Propiedades medidas

En cada punto de muestreo se determinó la curva de retención de humedad del suelo (CRHS) además de una serie propiedades físicas, químicas y físico-químicas, consideradas de interés en el propósito de desarrollar PTFs. En la Tabla 2.1 están descritas cada una de las propiedades medidas, su simbología, el método determinación, así como las unidades empleadas en su cuantificación. En las celdas sombreadas se destaca la propiedad como tal, mientras que en las celdas en blanco se exponen las variables que se derivan de esa propiedad principal. Como parte de la información

también se dispone de la foto y del valor de la resistencia a la penetración del punto muestreado.

Tabla 2.1. Relación de propiedades medidas, simbología, método de determinación y unidades empleadas en su cuantificación en los puntos de muestreo seleccionados.

Propiedad	Símbolo	Método	Unidad
Curva de retención de humedad.	$\theta(h)$	Caja de arena y olla Richards)	
<ul style="list-style-type: none"> Humedad volumétrica a los potenciales matriciales 1, 5, 10, 30, 100, 300, 1000 y 1500 kPa. 	$\theta_{v_i}(\dagger)$		$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
<ul style="list-style-type: none"> Coefficientes según el modelo analítico de van Genuchten (1980). 	θ_s y θ_r		$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
	α		cm^{-1}
	n		-
Distribución del tamaño de partículas	DTP	Método del hidrómetro	
<ul style="list-style-type: none"> Arena, Limo y Arcilla según el esquema de la USDA 	arena, limo y arcilla		Por ciento
Distribución del tamaño de agregados	DTA	Sávvinov (Kaúrichev <i>et al.</i> , 1984)	
<ul style="list-style-type: none"> Agregados secos: >10, 10-7, 7-5, 5-3, 3-2, 2-1, 1-0.5, 0.5-0.25 y <0.25 mm. 	$AS_j(\ddagger)$		Por ciento
<ul style="list-style-type: none"> Agregados húmedos >5, 5-3, 3-2, 2-1, 1-0.5 y 0.5-0.25 y <0.25 mm. 	$AH_j(\ddagger)$		Por ciento
Coeficiente de estabilidad de agregados secos ($\Sigma \% AS_{0.25-10} / (\% AS_{>10} + \% AS_{<0.25})$)	CEAS		-
<ul style="list-style-type: none"> Coeficiente de estabilidad de agregados húmedos ($\% \Sigma AH_{>0.25} / AH_{<0.25}$) 	CEAH		-
<ul style="list-style-type: none"> Índice de estabilidad ($\Sigma \% AH_{>0.25} / \Sigma \% AS_{>0.25}$) 	IEST		-
Materia orgánica	MO	Walkley and Black (1938)	Por ciento
Densidad aparente	Da	Gravimétrico	Mg m^{-3}
Densidad específica	Dr	Picnómetro	Mg m^{-3}
Capacidad de cambio de bases	CCB		cmol kg^{-1}
<ul style="list-style-type: none"> Sodio, Potasio 	Na y K	Fotometría	cmol kg^{-1}
<ul style="list-style-type: none"> Magnesio y Calcio 	Mg y Ca	Método volumétrico con Etilen-Diamin-Tetracetic)	cmol kg^{-1}
pH al agua y pH al Cloruro de Potasio	pH(H ₂ O) y pH(KCl)	pH-metro	-

El subíndice en † hace referencia al potencial matricial (kPa) y en ‡ al intervalo del tamaño de agregado (mm).

Entre las propiedades figuran la distribución del tamaño de partículas (DTP), el contenido de materia orgánica (MO) y la densidad aparente (Da), las cuales constituyen variables típicamente empleadas en la mayoría de la PTFs hidráulicas desarrolladas a nivel internacional. Atendiendo a la significación de la estructura del suelo en su característica de retención y a los criterios de varios trabajos publicados en la literatura (Rawls *et al.*, 1991; Pachepsky y Rawls, 2003; Guber *et al.*, 2003), la distribución del tamaño de agregados (DTA) fue otra de las propiedades evaluadas para la estimación indirecta de la CRHS en la región.

También resultó de interés caracterizar la mineralogía de la fracción arcilla mediante la evaluación de la capacidad de cambio de bases (CCB), lo cual permite distinguir entre grupos suelos con el mismo grado de arcillamiento pero con distinto funcionamiento hidráulico. Se incluye como posible estimador al pH del suelo, el cual de conjunto con la CCB, ha sido empleado en otras aplicaciones relacionadas con suelos tropicales (Hodnett y Tomasella, 2002) y es de fácil determinación. La determinación de la densidad específica (D_r) tiene el propósito de evaluar la metodología empleada para el cálculo de la DTP (Gee y Or, 2002).

La CRHS fue ajustada al modelo analítico de van Genuchten (ver ec.1.6), a partir de lo cual se obtuvieron los parámetros θ_s , θ_r , α , y n que define este modelo. De la CRHS se obtuvieron también las componentes principales (Stevens, 1996) de la humedad volumétrica a cada uno de los potenciales considerados (Tabla 2.2), permitiendo reducir los datos de la curva en un conjunto menor de variables no correlacionadas y ganar en claridad en muchos de los análisis realizados. Tanto los parámetros de van Genuchten como las dos componentes principales (CP_1 y CP_2) obtenidas se incorporaron a la base de datos original de propiedades medidas y fueron tratadas como variables adicionales en el estudio.

Tabla 2.2. Matriz de componentes principales de la humedad volumétrica.

Comp. principales	θ_{V-1kPa}	$\theta_{V-5 kPa}$	$\theta_{V-10 kPa}$	$\theta_{V-30 kPa}$	$\theta_{V-100 kPa}$	$\theta_{V-300 kPa}$	$\theta_{V-1000 kPa}$	$\theta_{V-1500 kPa}$
CP_1 (83 %)	0.916	0.918	0.927	0.922	0.968	0.900	0.879	0.874
CP_2 (13 %)	-0.321	-0.366	-0.363	-0.284	0.017	0.427	0.471	0.473

() se muestra la varianza total explicada.

Las profundidades muestreadas fueron 10-15 y 35-40 cm, resultando en total 229 las muestras de suelo tomadas, en tres sitios se pudo medir a una sola de las profundidades. La elección de la primera de estas profundidades, 10-15 cm, toma en cuenta la muy marcada variabilidad espacio temporal de la característica de retención de humedad en los primeros centímetros de suelo, causada por el laboreo, el cultivo y los continuos procesos de humedecimiento y secado (Mapa *et al.*, 1986; Or, 1996; Or y Ghezzehei, 2002; Strudley *et al.*, 2008). La segunda profundidad muestreada (35-40 cm), además de ser de interés para los principales cultivos de la región, provee un mayor rango de variación de las propiedades de interés, y con ello una mayor eficiencia de las nuevas PTFs por desarrollar.

La toma de muestras se llevó a cabo con humedades próximas a capacidad de campo. Ello se logró concentrando las campañas de muestreos (13 en total) durante el período

lluvioso, priorizando las áreas bajo riego (32 puntos en total), o simplemente adicionando agua al punto de muestro.

2.4. Metodología general de los análisis desarrollados

En el trabajo se aplicaron una serie de metodologías orientadas al cumplimentar los objetivos declarados, las cuales quedan recogidas en la Figura 2.6. En primer lugar, los análisis exploratorios permiten una breve descripción de las propiedades y la identificación de las variables del suelo medidas mejor correlacionadas con la CRHS. A continuación en los análisis espaciales se caracteriza, mediante técnicas geoestadísticas, el grado de estructuración espacial y de correlación espacial cruzada entre propiedades medidas y se identifican sus principales tendencias regionales a partir de su interpolación por kriging (mapas regionalizados). Estas dos fases de procesamiento conforman el primer acápite de resultados y discusión. En un segundo acápite se incorporan el resto de los análisis espaciales dirigidos a identificar los patrones de la CRHS de la región, las cuales son previamente agrupadas a partir del procedimiento de Conglomerados Jerárquicos. Estos patrones espaciales se describen a partir de las propiedades del suelo medidas y se contrastan además con los de suelos de la región.

Con posterioridad se procede a la obtención de las nuevas PTFs para lo cual se subdivide aleatoriamente la base de datos medidos en un subconjunto de desarrollo y uno de validación. Estos subconjuntos, integrados por las propiedades del suelo mejor correlacionadas con la CRHS, se emplean en la implementación de los métodos de regresión lineal múltiple y de redes neuronales. Por estas vías se derivan una gama de PTFs que tienen en cuenta todo el rango de propiedades medidas, específica de suelos Ferralíticos y por agrupamientos de CRHS. Lo inherente al desarrollo de las PTF se expone en tercer acápite de resultados y discusión. A continuación se analiza en un cuarto epígrafe la incertidumbre de las PTFs obtenidas mediante su evaluación con el empleo de variables de entrada medidas, interpoladas y con la incorporación en los cálculos del patrón espacial del error de estimación interpolado. Por último, los análisis de sensibilidad de los términos del balance hídrico demuestran la importancia de la caracterización espacial de las CRHS en el manejo hidrológico de los suelos, en especial en aplicaciones vinculadas al efecto del cambio de régimen de precipitaciones.

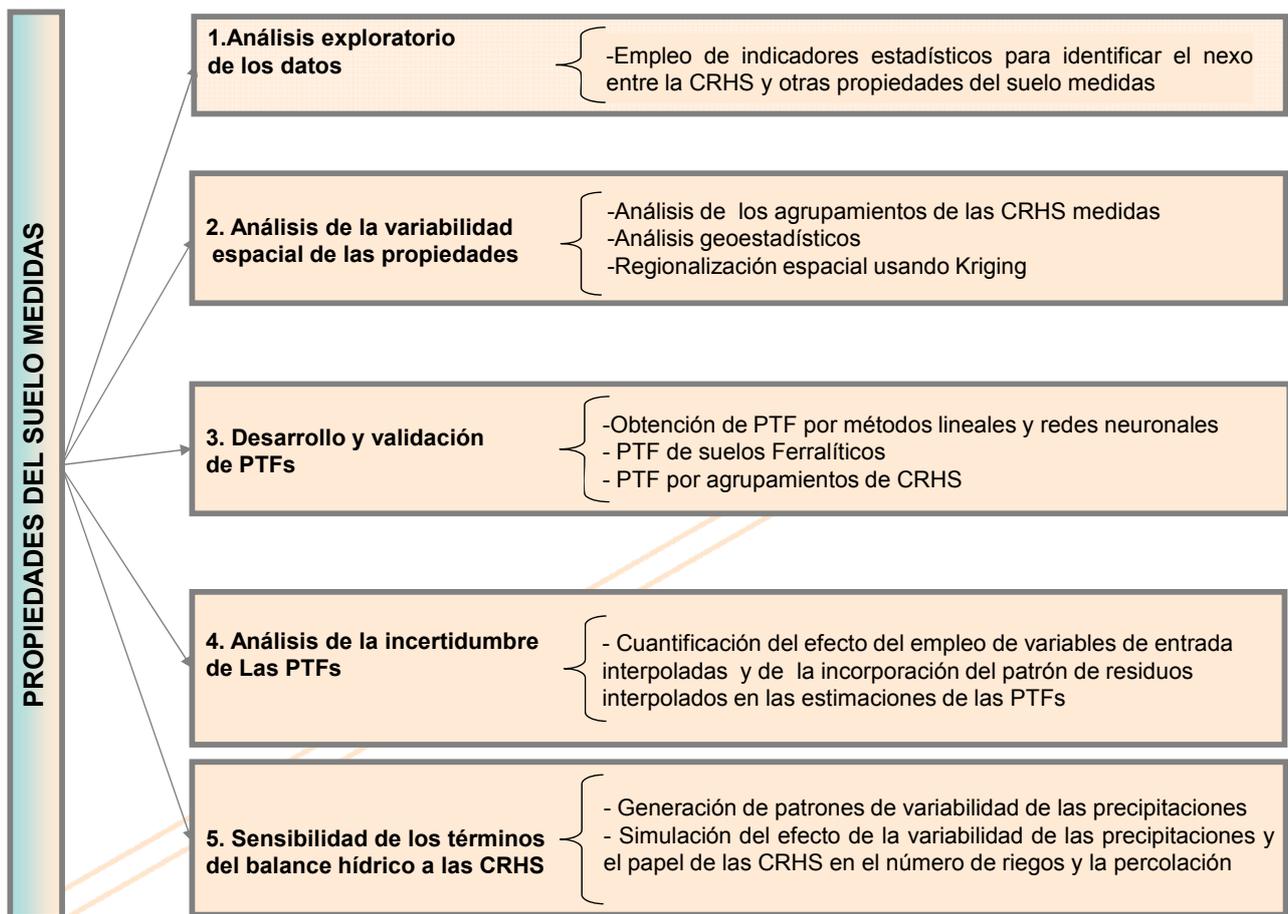


Figura 2.6. Representación esquemática de las tareas desarrolladas en el trabajo de tesis.

2.4.1 Análisis exploratorio de la información

El análisis exploratorio permite identificar las variables del suelo medidas de mayor poder predictivo de la curva de retención de humedad, y por ende sujetas a ser empleadas en ulteriores análisis encaminados al desarrollo de las nuevas PTFs. Los criterios estadísticos de este tipo de análisis se fundamentan en el cálculo de la media aritmética

(\bar{z}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de correlación bivariada (r_{zy}) mediante las expresiones 2.1. 2.2 y 2.3, respectivamente.

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (2.2)$$

$$r_{zy} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y})}{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

donde z_i y y_i son las N observaciones de las variables z y y , representando \bar{z} y \bar{y} sus valores medios.

Los aspectos inherentes al análisis de conglomerados jerárquicos se exponen en el marco donde son implementados (acápito 2.4.2.1).

2.4.2 Relación entre agrupamientos de suelos y agrupamientos de curvas

El primer acercamiento al problema de la variabilidad espacial de las propiedades de retención de humedad de los suelos en una región se lleva a cabo, generalmente, a partir de la información de un mapa de suelos disponible. Sin embargo muchas veces se desconoce el grado real de asociación entre la variabilidad de los suelos presentes y la de las curvas de retención.

Los mapas de suelos son útiles en muchas aplicaciones, pero en general se basan en factores que están débilmente correlacionados con las propiedades hidráulicas (Mcbratney y Odeh, 1997). Es común encontrar dentro de una unidad del mapa de suelos variaciones en las propiedades hidráulicas que deben tenerse en cuenta para evitar errores inaceptables en el manejo de estos y en las predicciones de los modelos de simulación (Romano, 2004). De ahí la importancia de caracterizar el patrón de retención de humedad y su relación espacial con el suelos de la región bajo estudio.

2.4.2.1 Agrupamiento espacial de las curvas de retención de humedad.

En el trabajo de tesis se lleva a cabo la conglomeración o agrupamiento de las CRHS mediante el procedimiento de Conglomerados Jerárquicos (Gordon, 1999). Este procedimiento intenta identificar grupos relativamente homogéneos de casos (o de variables) basándose en las características seleccionadas, mediante un algoritmo que comienza con cada caso (o cada variable) en un conglomerado diferente y combina los conglomerados hasta que sólo queda uno. Es posible analizar las variables brutas o elegir de entre una variedad de transformaciones de estandarización.

El método de conglomeración elegido fue el de vinculación inter- grupos, el cual presenta la ventaja de aprovechar la información de todos los elementos de los conglomerados que se comparan. Las medidas de distancia o similaridad se generaron por el procedimiento de la distancia Euclídeana al cuadrado. Para asegurar que la división sugerida por el

algoritmo tienen un significado real y no distorsiona la verdadera estructura de los datos, se lleva a cabo el proceso de validación mediante la práctica usual de evaluar varios métodos de conglomeración (Sousa y Tendeiro, 2005). La validación también incluye la comparación de dendogramas (Lapointe y Legendre, 1995).

En el proceso se considera a la saturación relativa o humedad paramétrica (Θ) como la variable de conglomeración, la cual se calcula indistintamente a partir de la humedad gravimétrica o volumétrica a cada potencial matricial (ecuación 1.6). Dicha humedad paramétrica tiene en cuenta las variaciones relativas o cambios de pendientes de la curva, estando estas variaciones asociadas a cambios de retención.

En la prueba de comparaciones múltiples (llevada a cabo para contrastar las medias pertenecientes a diferentes grupos) que suponen varianzas iguales se emplean la prueba de Hochberg (1974). Esta es una variación introducida por este autor a la prueba de Tukey (1953), la cual se considera más adecuada cuanto más se acentúan las diferencias entre grupos (Hochberg y Tamhane, 1987). En el caso que se asume desigualdad de varianzas se emplea la de Games y Howell (1976).

La regionalización espacial de los conglomerados o agrupamientos se efectúan a partir del método del vecino más cercano (Clark y Evans, 1954). A partir de este método se interpola la pertenencia o clasificación del punto en cuestión.

2.4.3 Análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo medidas

Las variaciones espaciales del valor de las propiedades del suelo son altamente irregulares y no descritas con exactitud por medios de ecuaciones determinísticas (Nielsen y Wendroth, 2003). Sin embargo, dichas variaciones no siempre tienen lugar de manera totalmente desordenada (Beckett y Webster, 1971; Warrick y Nielsen, 1980; Burrough, 1993), pudiendo exhibir una significativa tendencia en la estructura de su variabilidad espacial. La rama de la estadística que parte de la observación de que la variabilidad o continuidad espacial de las variables distribuidas en el espacio tienen una estructura particular (Journel y Huijbregts, 1978; Curran y Atkinson, 1998) se conoce como Geoestadística.

La Geoestadística puede ser empleada para analizar la estructura espacial de las propiedades y para calcular los valores de nodos no muestreados en una rejilla numérica superpuesta (Romano y Palladino, 2002). Su herramienta fundamental es la función semivarianza, la cual se define mediante la expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2.4)$$

Esta función provee una medida promedio del cuadrado de las diferencias entre los valores medidos en función de la distancia de separación h . En la expresión $N(h)$ es el número de pares de valores separados a una distancia h , $z(x_i)$ son los valores de la variable z medidos en cada localidad x_i . A partir de las semivarianzas se construyen los semivariogramas, que no es más que la expresión gráfica de esa función. Como una extensión de la semivarianza surge también la semivarianza cruzada, que cuantifica la correlación espacial entre dos propiedades medidas, y y z , a través de la expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)][y(x_i) - y(x_i + h)] \quad (2.5)$$

y de la cual se obtiene el semivariograma cruzado correspondiente.

El semivariograma viene caracterizado por tres parámetros fundamentales: el residuo, el alcance y la meseta, indicativos del grado de estructura espacial de las variables (Goovaerts, 2000). Detalles sobre el significado físico de cada uno de ellos y el modo de obtención se pueden encontrar en la vasta literatura que existe sobre el tema (Journel y Huijbregts, 1978; Goovaerts, 1997; Nielsen y Wendroth, 2003).

Una vez obtenidos estos parámetros se procede a la implementación de la técnica de interpolación Kriging (Journel y Huijbregts, 1978; Warrick *et al.*, 1986) que constituye la base del proceso de regionalización llevado a cabo en el trabajo. El Kriging es una técnica de estimación que, a partir de la información del semivariograma, proporciona el mejor estimador lineal no sesgado (BLUE, en inglés, Best Linear Unbiased Estimator) del valor de la variable en un punto no medido a partir de la información medida en sus vecindades, y que además proporciona una error de estimación que depende del semivariograma obtenido y de las localizaciones de los datos originales (Journel y Huijbregts, 1978; Nielsen y Wendroth, 2003).

2.4.4 Desarrollo y validación de funciones de pedotransferencia

Una vez investigada la dependencia entre la curva de retención y las propiedades del suelo medidas se procede a hallar las nuevas funciones de pedotransferencia. El estudio se enfoca a la determinación de PTFs generales (que toman en cuenta toda la base de datos) y PTFs específicas. Dentro de las específicas se obtienen PTF para los suelos Ferralíticos y PTFs por agrupamientos de curvas. Para ello se debió previamente subdividir el conjunto total de datos en dos subconjuntos, como una alternativa que

facilitase, no solo la obtención de dichas relaciones funcionales, sino también su posterior validación.

2.4.4.1 Subconjuntos de desarrollo y validación

Para el desarrollo y validación de las PTFs, se seleccionaron dos subconjuntos provenientes del conjunto de datos conformado por el valor de las propiedades (229 juegos de valores). Los mismos se definieron como subconjunto de desarrollo (SD) y subconjunto de validación (SV). Como su nombre lo indica el SD tiene como finalidad desarrollar las PTFs a partir de un determinado método matemático de ajuste. En cambio el SV está integrado por puntos en los cuales se valida estadísticamente las funciones desarrolladas. El proceso de división de la información disponible en dos subconjuntos destinados a desarrollar y validar se denomina validación cruzada (Hjorth, 1994).

Para la obtención del SD se extrajeron de manera aleatoria 100 puntos de cada una de las profundidades de estudio, el resto de los puntos no considerados (29 puntos) integraron el SV. Las particiones de estos subconjuntos obedecen a la necesidad de un elevado volumen de información para el ajuste eficiente de las PTFs. Los puntos de los SD y SV se muestran la Figura 2.7.

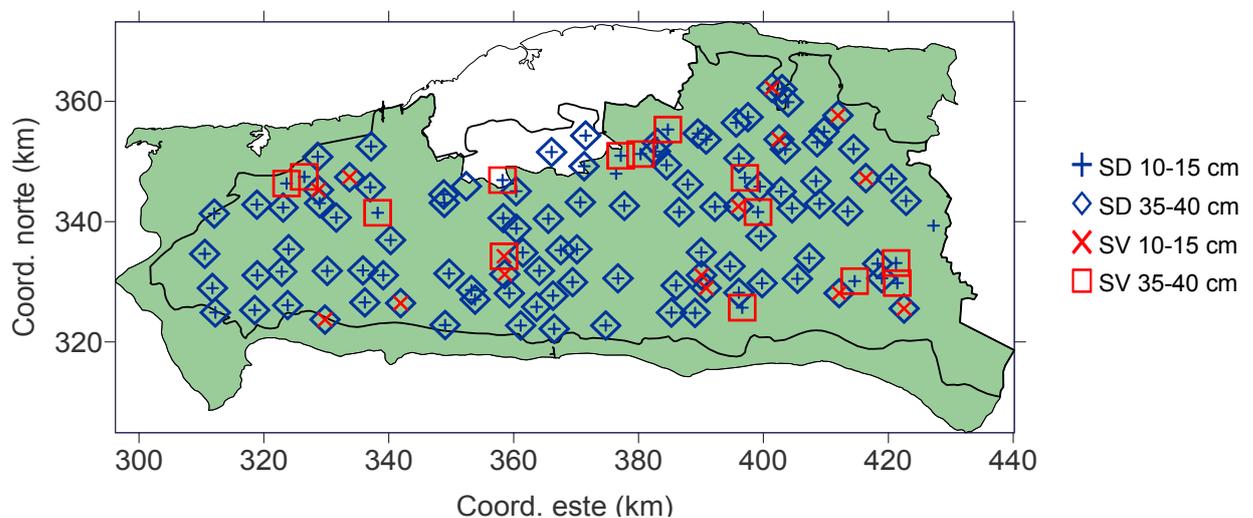


Figura 2.7. Puntos que conforman los subconjuntos de desarrollo y evaluación elegidos.

La Tabla 2.3 muestra la estadística asociada a las CRHS que componen el SD y el SV. Mediante un ANOVA simple se demuestra que no existen diferencias significativas entre las medias de ambos subconjuntos (nivel de significación 0.01). Las Figuras 2.8 muestran las curvas de ambos subconjuntos. Es también destacable que en ambos subconjuntos aparecen representadas las mismas clases texturales (Figuras 2.8c y 2.8d).

El resto de las variables que de conjunto con las CRHS participan del desarrollo y validación de las nuevas PTFs se derivan de los análisis dirigidos a identificar las propiedades del suelo medidas mejor correlacionadas con las humedades de la curva de retención.

Tabla 2.3. Estadística de las CRHS del subconjunto de desarrollo (SD) y evaluación (SE) elegidos.

Variables	SD (N=200)				SV (N=29)				
	Mín.	Máx.	Media	Desv. típ.	Mín.	Máx.	Media	Desv. típ.	
CRHS ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$\theta_{V-1 \text{ kPa}}$	0.320	0.786	0.528	0.067	0.373	0.639	0.516	0.057
	$\theta_{V-5 \text{ kPa}}$	0.320	0.785	0.510	0.068	0.355	0.637	0.499	0.061
	$\theta_{V-10 \text{ kPa}}$	0.292	0.785	0.493	0.072	0.343	0.634	0.485	0.064
	$\theta_{V-30 \text{ kPa}}$	0.240	0.771	0.454	0.087	0.321	0.625	0.454	0.074
	$\theta_{V-100 \text{ kPa}}$	0.204	0.611	0.407	0.081	0.279	0.601	0.414	0.077
	$\theta_{V-300 \text{ kPa}}$	0.081	0.546	0.367	0.087	0.147	0.567	0.377	0.094
	$\theta_{V-1000 \text{ kPa}}$	0.043	0.513	0.345	0.083	0.115	0.527	0.357	0.088
	$\theta_{V-1500 \text{ kPa}}$	0.041	0.505	0.339	0.081	0.114	0.514	0.351	0.086

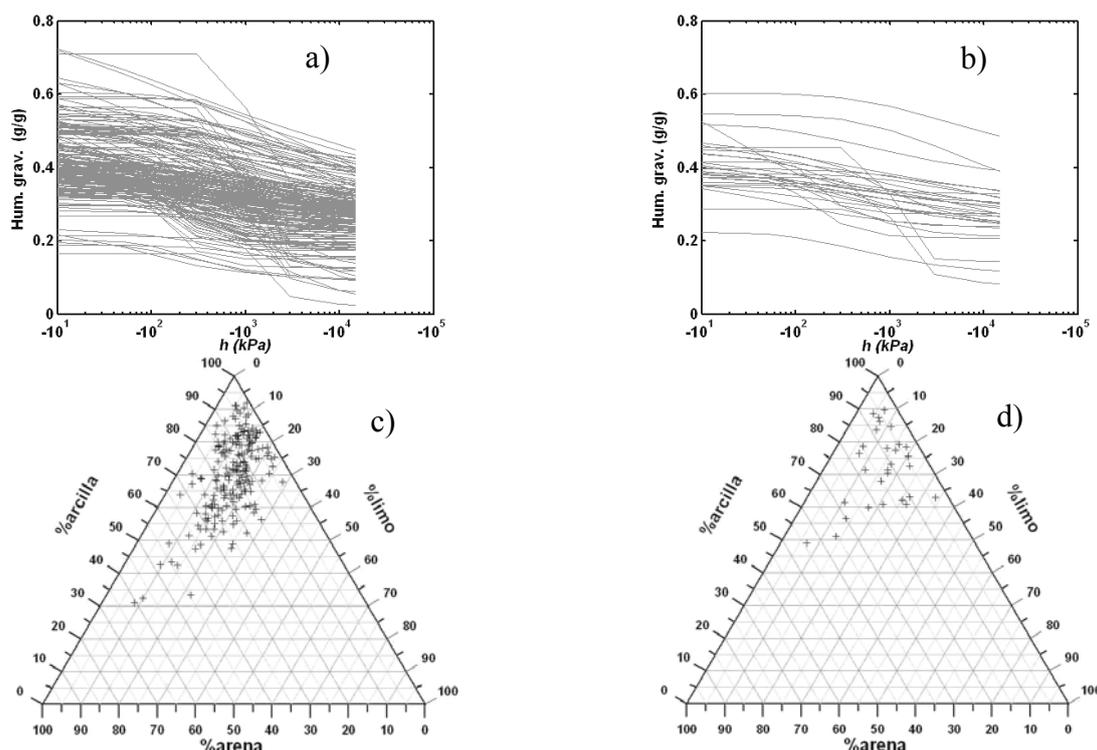


Figura 2.8. Curvas de retención de humedad y triángulo textural correspondientes a los puntos pertenecientes a los subconjuntos: a) y b) de desarrollo (SD) y c) y d) de validación (SV).

La bondad de ajuste entre las CRHS medidas y las predichas durante los proceso de de desarrollo y validación se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error medio (EM) y el valor de la raíz del error cuadrático medio (RECM), estos últimos cuantificados a partir del error en cada punto.

$$R^2 = \frac{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{med}} - \bar{\theta} \right) \left(\theta_i^{\text{pred}} - \bar{\theta} \right) \right)^2}{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{med}} - \bar{\theta} \right)^2 \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{pred}} - \bar{\theta} \right)^2} \quad (2.6)$$

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{pred}} - \bar{\theta}_i^{\text{med}} \right) \quad (2.7)$$

$$RECM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{pred}} - \bar{\theta}_i^{\text{med}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

En las expresiones anteriores θ_i^{pred} y θ_i^{med} son los valores de humedad predichos y medidos, respectivamente y \bar{q} es el contenido medio de humedad. También se empleó como criterio de calidad del ajuste el coeficiente de información de Akaike (AIC, Akaike, 1973):

$$AIC = N \ln \sum_{i=1}^N \left(\theta_i^{\text{pred}} - \bar{\theta}_i^{\text{med}} \right)^2 + 2np \quad (2.9)$$

donde N es el número total de datos y np el número de parámetros empleados. El AIC toma en cuenta no solo el grado de ajuste en sí, sino también el número de parámetros empleados para desarrollar las funciones. En este sentido, el AIC es útil para discriminar entre funciones desarrolladas con similares grado de exactitud.

2.4.4.2 Métodos de ajuste de las PTFs

El desarrollo de las funciones de pedotransferencia se llevó a cabo por dos métodos de ajuste, el método de Regresión Lineal Múltiple (RLM) y el método de Redes Neuronales (RN). Ambos han sido los más difundidos en este tipo de aplicaciones a nivel mundial (Merdun *et al.*, 2006). A continuación se describen las especificidades relacionadas con la implementación de cada uno de ellos.

2.4.4.2.1 Regresión lineal múltiple

Se emplea el método de análisis de regresión lineal múltiple para relacionar analíticamente las propiedades del suelo más relevantes inferidas en el estudio y las curvas de retención de (PTF). Con este propósito, y con el auxilio del programa SPSS versión 11.5.1, se aplica a los datos un modelo lineal general (MLG).

El procedimiento de MLG (Dobson, 2001) univariante proporciona un análisis de regresión y un análisis de varianza para una variable dependiente (CRHS) mediante uno o más

factores o variables (propiedades del suelo mejor correlacionadas). Las variables de factor dividen la población en grupos. Con el procedimiento se pueden contrastar hipótesis nulas sobre los efectos de otras variables en las medias de varias agrupaciones de una única variable dependiente. Se pueden investigar las interacciones entre los factores así como los efectos de los factores individuales, algunos de los cuales pueden ser aleatorios. Además, se pueden incluir los efectos de las covariables y las interacciones de covariables con los factores. Para el análisis de regresión, las variables independientes (predictoras) se especifican como covariables.

Se pueden contrastar tanto los modelos equilibrados como los no equilibrados. Además de contrastar hipótesis, el MLG genera estimaciones de los parámetros. Ello permite hallar las expresiones para la estimación de los contenidos de humedad a cada uno de los potenciales matriciales de la curva (8 en total), siendo identificadas en el trabajo el conjunto de estas expresiones analíticas como la nueva función de pedotransferencia desarrollada (PTF).

2.4.4.2.2 Redes Neuronales

El método de redes neuronales (MRN) constituye una herramienta contemporánea fundamental en disímiles campos de la investigación y la ingeniería. Una de sus grandes ventajas es que permite encontrar una relación matemática, en principio no lineal, entre las variables predictivas y las estimadas, por compleja que sea la interacción entre ambas. Es decir, no se requiere establecer *a priori* un modelo analítico no lineal dentro de la infinidad de modelos de este tipo existentes.

En el trabajo se elige una arquitectura de red del tipo “Feed-forward backpropagation” de dos capas, la más utilizada en el desarrollo de PTFs (Børgesen y Schaap, 2005), implementada con auxilio del paquete comercial MATLAB (Versión 7.0). El algoritmo de entrenamiento “backpropagation”, basado en un algoritmo de gradiente descendiente, ha sido extensivamente empleado en el entrenamiento de redes neuronales (Akbarzadeh *et al.*, 2009).

La función de transferencia o activación elegida por capas, encargada de acomodar las relaciones no lineales entre las entradas y las salidas, son combinaciones de una sigmoide o tangente hiperbólica y una función lineal. De acuerdo con Minasny y Mcbratney (2002) una combinación sigmoideal/lineal puede ajustar cualquiera de las entradas y salidas de la red. Por último, el número de neuronas elegidas por capas, encargadas de extraer la información a partir de las entradas y emplearla para predecir

las salidas, es variado durante cada realización hasta hallar el número de ellas que propicia los mejores resultados.

2.4.5 Evaluación de la contribución de la información espacial en el ajuste de las PTFs

Teniendo en cuenta la información derivada de la amplia base de datos georeferenciada obtenida, así como los resultados propios de esta tesis, es de interés conocer qué utilidad poseen ambas fuentes en reducir la incertidumbre de la estimación de la curva en puntos no medidos de la región de análisis. ¿Analizado desde otro enfoque, da lo mismo en el futuro estimar la curva en un punto no medido de la antigua Habana que hacerlo en otra provincia del país?

Nótese que a cada punto medido se le puede asociar un error entre la CRHS medida y la estimada con la PTF, y que a partir del mismo se puede obtener un patrón regionalizado del error, como mismo se obtuvo el de las propiedades. Es de esperar que la incertidumbre de la estimación esté asociada al punto de interés; es decir que la dimensión del error sea significativamente mayor en determinadas zonas de la región que en otra.

Precisamente en este acápite se analiza en qué medida se mejora la estimación si, al error total producto de aplicar la PTF se incorpora información relacionada con el patrón espacial de los residuos. Para ello se retoman de nuevo los subconjuntos de desarrollo y evaluación descritos en el epígrafe 2.4.4.1. Los puntos del SD se utilizan para obtener el patrón espacial de los residuos (kriging), en tanto a partir del SV se comparan:

1. El R^2 , el EM y la RECM empleando las PTFs halladas usando los valores medidos de las variables de entrada.
2. Los nuevos R^2 , EM y RECM si ahora al valor de los residuos calculados como en el paso anterior se sustrae el residuo interpolado a partir del patrón espacial de residuos obtenido usando el SD.
3. Similar a los pasos 1 y 2, pero en lugar de obtener el residuo en cada punto empleando los valores medidos de las variables de entrada, se emplean los valores interpolados de las mismas.

2.4.6 Las curvas de retención y su relación con el efecto del régimen hídrico en los suelos de la región

Un propósito de este trabajo de tesis es el de ilustrar la importancia de la caracterización espacial de las CRHS en el manejo hidrológico de los suelos, en especial en aplicaciones vinculadas al efecto del cambio de régimen de precipitaciones. Para cumplimentar este objetivo se desarrolla un estudio que combina un pequeño experimento de campo en un suelo Ferralítico perteneciente a la unidad de producción Ho Chi Minh, en Bainoa, Jaruco, y un estudio sintético basado en la creación de escenarios que respondan a una determinada distribución probabilística.

Un estudio sintético de este tipo debe tomar necesariamente en cuenta el carácter fuertemente estocástico de las precipitaciones (Rodríguez Iturbe y Porporato, 1999), por lo cual la creación de dichos escenarios se llevó a cabo a partir de la generación estocástica de patrones de ocurrencia (o frecuencia) e intensidad. Para ello se empleó un modelo exponencial asociado a la probabilidad de ocurrencia y otro asociado a la intensidad.

De acuerdo a Cox y Miller (1965) la distribución de los tiempos τ entre eventos de precipitación puede ser representada de manera exponencial con media $1/\beta$, representando β la frecuencia promedio de eventos, es decir:

$$f_{\tau}(t) = \beta \times e^{-\beta t}, \text{ para } t \geq 0 \quad (2.12)$$

mientras la lámina de los eventos de precipitación se asume como una variable aleatoria independiente I , descrita mediante una función de probabilidad exponencial.

$$f_H(t) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{t}{\beta}}, \text{ para } t \geq 0 \quad (2.13)$$

donde β es la lámina media entre los eventos.

En base a la Ec. (2.12) se generan distribuciones de días de lluvia y días de no lluvia, en tanto a partir de la Ec. (2.13) se generan probables valores de intensidad para los días de lluvia. Combinando ambas realizaciones estocásticas se obtiene un patrón único de precipitaciones que responde a cada una de las distribuciones.

En el estudio se prefiere simular el efecto de la variabilidad en el período seco por la importancia de esta etapa en la producción de renglones fundamentales como el cultivo de la papa y el peso que tiene el riego en sus rendimientos. Las series de precipitación a generar poseen una duración de 90 días (tres meses), lo cual también responde aproximadamente al ciclo vegetativo de este tubérculo. Para el ejercicio concreto de

generación se consideraron cinco posibles valores medios de días entre eventos de precipitación, desde 6 hasta 10 días, y otros cinco posibles valores de lámina promedio, 5, 7, 9, 11 y 13 mm. Los valores seleccionados toman en cuenta el patrón promedio observado en la estación meteorológica de Banoa para los meses de enero, febrero y marzo durante los últimos 10 años. Por cada valor de frecuencia e intensidad se generaron 20 posibles realizaciones, lo que hace un total de 10^4 simulaciones por tipo de suelo.

La investigación se apoyó a su vez en un pequeño experimento de campo basado en un seguimiento del potencial hídrico en un suelo sembrado con papa bajo riego. Como parte del mismo se colocaron tres juegos de tensiómetros, separados entre sí a aproximadamente 100 m, y conformados por tres de estos dispositivos ubicados a las profundidades de 10, 25 y 35 cm. Lecturas sistemáticas del potencial fueron efectuadas durante un período de aproximadamente dos meses, desde el 7 de enero hasta el 4 de marzo de 2011. La Figura 2.9 muestra los valores medios medidos del potencial a cada profundidad y una imagen del sitio experimental.

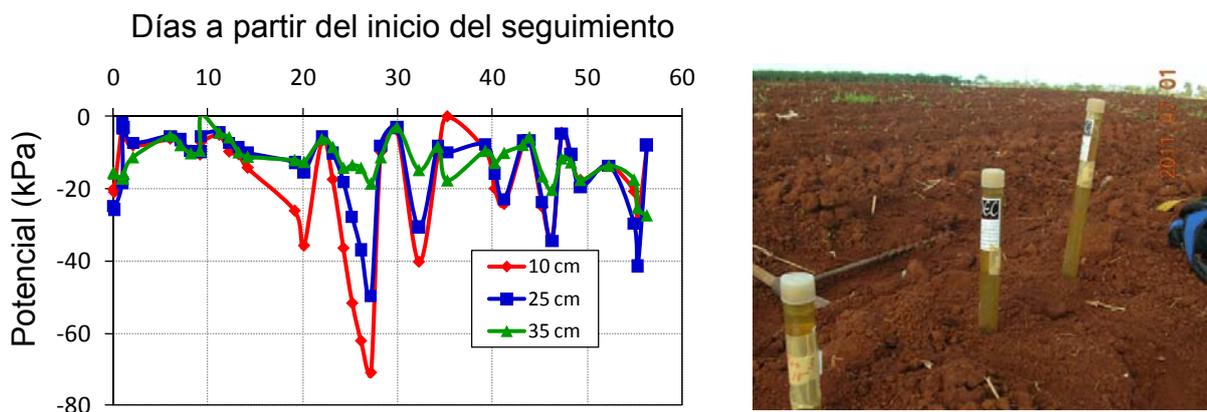


Figura 2.9. Valor promedio de los potenciales a 10, 25 y 35 cm de profundidad en suelo Ferralítico Rojo de Banoa, Jaruco, sembrado con papa y bajo régimen de riego. La imagen de la derecha muestra uno de los tres juegos de tensiómetros ubicados en el sitio experimental a partir de los cuales se obtuvieron lecturas sistemáticas del potencial hídrico.

Este experimento permitió, por un lado, comprobar in situ el comportamiento de la variabilidad del potencial hídrico en condiciones reales y los criterios de manejo que se siguen para el riego. Por otro lado, sirvió para determinar por método inverso la conductividad hidráulica saturada, necesaria en las simulaciones del flujo de agua en el perfil.

Empleando las curvas de retención de humedad medidas y el valor de conductividad estimado por método inverso se evaluó el efecto de la variabilidad asociada a los patrones de precipitación en los términos del balance hídrico, considerando una tasa

evapotranspirativa constante, igual a 4 mm/día. Para ello se tuvo en cuenta las lecturas del Evaporímetro Clase A, ubicado en la propia estación meteorológica, y el hecho de que la evapotranspiración bajo un régimen de riegos frecuentes es prácticamente potencial.

Básicamente se contrastaron dos variables en las simulaciones. En primer lugar el número de riegos total de la campaña necesario para mantener la humedad del suelo siempre por encima del 85 % de la capacidad de campo, aplicando láminas de riego de 15 mm, tal y como se hace en la práctica productiva de la unidad. El otro término evaluado es la lámina de agua percolada por debajo de los 100 cm del suelo.

El modelo de simulación fue implementado en MATLAB (Versión 7.0), teniendo en cuenta las ventajas que ello ofrece con respecto a aplicaciones profesionales como HYDRUS (Simunek *et al.*, 2005). Estos modelos toman el día como unidad mínima de tiempo a la hora de considerar las tasas de flujo superficial; así por ejemplo, un evento de lluvia se asume distribuido en 24 horas, lo cual incorpora errores innecesarios.

El análisis de los resultados se apoya en la elaboración de mapas de contorno de la media y la desviación estándar del número de riegos y el agua percolada para cada escenarios, analizando cómo intervienen en estos resultados la propia curva de retención de humedad y el umbral de potenciales utilizado para dar inicio a un riego.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Breve descripción de las propiedades medidas

En este acápite se describen los aspectos más relevantes de las propiedades del suelo medidas. En el caso de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas se incluye una breve caracterización del comportamiento espacial observado así como la interrelación entre ellas. Para las CRHS se llevan a cabo además algunos análisis por tipo de suelo y por profundidad. El análisis de las propiedades también incorpora el análisis de correlación espacial cruzada entre pares de variables.

3.1.1 Comportamiento de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas

La Tabla 3.1 muestra el comportamiento estadístico promedio de cada una de las propiedades evaluadas. En aquellos casos en los que la distribución de la propiedad es de tipo logarítmico se cuantifica la estadística a partir del logaritmo decimal de sus valores.

Tabla 3.1. Comportamiento estadístico de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas medidas.

Propiedad	N	Mín.	Máx.	Media	D.est.	Propiedad	N	Mín.	Máx.	Media	D.est.
arena (%)	229	0.69	60.53	15.24	10.47	Log (CEAS) (-)	229	0.01	1.23	0.61	0.28
limo (%)	229	3.00	33.66	14.53	5.50	Log (CEAH) (-)	229	-1.28	0.56	-0.31	0.33
arcilla (%)	229	30.97	91.81	70.24	11.67	IEST (-)	229	0.22	0.97	0.66	0.15
MO (%)	229	0.16	5.09	2.06	1.11	AS ₇₋₁₀ (%)	229	0.37	28.03	13.63	4.85
Ca (cmol kg ⁻¹)	229	3.00	62.50	22.35	13.30	AS ₅₋₇ (%)	229	0.33	17.13	6.19	2.71
Mg (cmol kg ⁻¹)	229	1.10	16.50	5.95	3.13	AS ₃₋₅ (%)	229	0.25	50.25	20.97	10.17
Log(Na)(cmolkg ⁻¹)	229	-1.40	0.08	-0.68	0.33	AS ₂₋₃ (%)	229	0.11	42.61	8.47	8.84
Log(K)(cmol kg ⁻¹)	229	-1.40	0.58	-0.57	0.38	AS ₁₋₂ (%)	229	0.13	27.32	10.84	6.78
Log (P) (mg kg ⁻¹)	229	-1.00	2.95	1.55	0.69	Log (AS _{0.5-1}) (%)	229	-1.44	1.46	0.47	0.59
CCB (cmol kg ⁻¹)	229	4.70	71.75	29.06	15.20	Log (AS _{0.25-0.5})	229	-1.38	1.52	0.35	0.55
Log (pH _{H2O}) (-)	226	0.74	0.92	0.88	0.04	AH ₃₋₅ (%)	229	0.00	50.37	14.82	12.43
Log(pH _{KCl}) (-)	226	0.71	0.88	0.84	0.04	AH ₂₋₃ (%)	229	0.63	38.66	12.24	6.23
Dr (g cm ⁻³)	229	2.26	2.91	2.65	0.10	AH ₁₋₂ (%)	229	1.45	32.22	12.85	5.96
Da (g cm ⁻³)	229	0.92	1.90	1.30	0.18	Log (AH _{0.5-1}) (%)	229	-0.09	1.51	0.83	0.31
						Log (AH _{0.25-0.5})	229	-0.41	1.59	0.72	0.38

El comportamiento de la composición del tamaño de partículas se ajusta a lo reportado para la región, con un marcado predominio de la fracción arcilla y muy bajos contenidos de limo. La variabilidad espacial del contenido de arcilla es relativamente baja debido a que los tipos de suelos presentes en la región no se caracterizan por diferencias apreciables en los valores de esta fracción. Nótese que el coeficiente de variación (no incluido para ganar en brevedad) de la arcilla es inferior al de las otras dos fracciones texturales.

El bajo valor promedio de la materia orgánica (2.06 %) se asocia con las practicas de manejos y su influencia en la degradación de sus contenidos en los suelos de Cuba (Funes, 2001; Ponce de León, 2003; Hernández *et al.*, 2006), aunque sin descartar en ningún caso el tipo de suelos como tal. Un análisis de muestras pareadas de las propiedades a cada profundidad arroja que solo la arcilla y la MO muestran diferencias significativas con un 95% de confianza. En el horizonte superficial el porcentaje de arcilla es como promedio 6 unidades menor, en tanto la MO promedio es 0.55 unidades más alta.

Entre los cationes, el contenido de calcio (Ca) alcanza un valor medio de $22.32 \text{ cmol kg}^{-1}$, alrededor del 76 % de la capacidad de cambio de bases (CCB). Este predominio del calcio respecto al resto de las bases cambiables ha sido reportado en varios estudios en Cuba (Camacho *et al.*, 1985; Marín *et al.*, 1990; Reynosa y Marín, 1990; Chang *et al.*, 1990). Su elevada desviación, y en general la de la CCB, da una idea del variable comportamiento de esta propiedad entre los distintos tipos de suelos de la región, uno de los argumentos principales para ser tenida en cuenta en las funciones de pedotransferencia. Desde este punto de vista manifiesta un claro contraste con el patrón observado para la arcilla.

Los mayores contenidos del calcio se localizan en áreas de elevaciones del centro y las porciones nororiental y noroccidental de la región (ver Figura 2.2), predominantemente bajo suelos Pardos. El contenido medio de calcio en los Ferralíticos de la región es de $17.30 \text{ cmol kg}^{-1}$, lo cual se asocia a suelos medianamente saturados en bases alcalinotérreas (Instituto de Suelos, 1975; Paneque *et al.*, 1991).

En cuanto al pH, lo más destacable es su elevado valor promedio (7.59), lo cual es una muestra más de los cambios que tienen lugar en las propiedades. También Cancio (2002) corrobora un aumento significativo del porcentaje de áreas con valores de pH mayores a 7, pertenecientes a varias Empresas de Cultivos Varios de La Habana. Similar tendencia encontró Jonh *et al.* (2009), en un estudio que abarcó una amplia región agrícola de Güira de Melena. Hernández *et al.* (2006) se ha pronunciado sobre este fenómeno de alcalinización de los suelos de La Habana, asociándolo al funcionamiento hídrico de los suelos Ferralíticos y el efecto que sobre este tienen los cambios globales. Para Bosch *et al.* (2001) este hecho responde, en cambio, al uso durante décadas de aguas bicarbonatadas cálcicas para el riego agrícola.

Con relación a la densidad aparente (Da), el aspecto más llamativo es el máximo que se reporta, 1.9 g cm^{-3} , obtenido en el extremo suroeste de la región de estudio, perteneciente

al municipio de Artemisa. Para todas las muestras de suelo en esa zona se obtuvieron valores de densidad aparente sumamente elevados. Dichos valores fueron contrastados con varios especialistas de suelo de la Universidad Agraria de la Habana. Estos se atribuyen a los elevados contenidos de arena, los más altos en la región, unido a la abundante presencia de concreciones de hierro.

Valores cercanos al promedio en esta porción del área bajo estudio, en torno a 1.6 g cm^{-3} , han sido reportados en varios trabajos realizados en la Llanura Meridional de Pinar del Río, la cual se extiende hasta Artemisa (Alfonso, 1985). En el resto de la región de análisis el comportamiento de esta propiedad fue más o menos homogéneo. Es de interés resaltar el relativamente elevado valor de densidad promedio entre los suelos Ferralíticos muestreados, ascendente a 1.3 g cm^{-3} . El mismo supera el valor umbral de la densidad crítica de los suelos Ferralíticos, igual a 1.25 g/cm^3 (Hernández *et al.*, 2006). Esta tendencia sistemática responde, principalmente, a la antropogénesis intensa a que han sido sometidos buena parte de los suelos de la provincia. Ello ha sido corroborado por aquellos autores y constituye una de las manifestaciones de los cambio globales en las propiedades de los suelos.

Otro elemento de interés es el comportamiento de esta variable en profundidad. La Figura 3.1 muestra la gráfica de dispersión entre los valores de la Da a ambas profundidades. Curiosamente la disponibilidad de puntos a cada lado de la recta 1:1, representada en el gráfico, es similar. Ello indica que apenas existen diferencias en la distribución por profundidades, y que por lo tanto el problema de la compactación asociada a factores antrópicos se refleja a profundidades relativamente bajas. Ello se pudo comprobar directamente a través de las lecturas de penetrometría efectuadas.

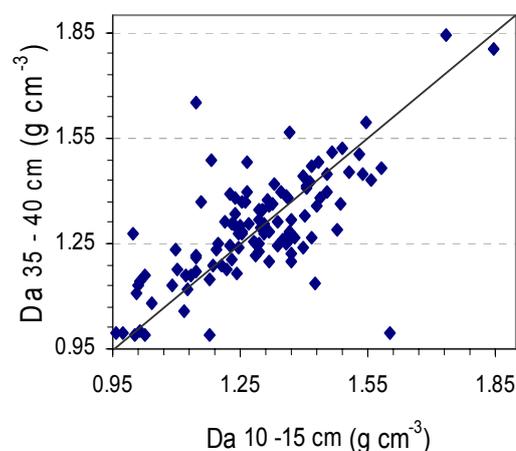


Figura 3.1. Comparación entre los valores de la densidad aparente en suelos Ferralíticos medidos a las profundidades de 10-15 y 35-40 cm. La recta representa la relación 1:1 entre las variables.

El estado estructural de los suelos muestreados califica como de moderado a bueno de acuerdo a los criterios de Luis y Martín (2003). Para estos autores la composición de agregados es adecuada cuando la suma de agregados secos entre 0.25 y 10 mm representa entre un 60 y un 80 % del total, mientras que la suma de los húmedos entre 0.25 y 5 mm se halla entre el 55 y 70 %. En el presente estudio los valores promedios se hallan en torno al límite inferior correspondiente: 59.6% para los secos y 55.7 % para los húmedos. El valor de la desviación en ambos casos es aproximadamente del 15%, lo cual da lugar a que en 77 muestras se satisfacen ambos criterios. Claramente, el criterio de clasificación abordado toma en cuenta la masa total de agregados y como tal es pobre en caracterizar la propia distribución.

Como puede inferir de la Tabla 3.1, la distribución tiende a ser de tipo logarítmico para las fracciones más pequeñas, por debajo de 1mm, y de tipo normal para las más grandes. Un elemento interesante es que el coeficiente de variación (no mostrado) crece casi linealmente con la disminución del tamaño de agregados, desde un 36 % para aquellos entre 7 y 10 mm, hasta casi un 160 % para el rango 0.25-0.5 mm. Sin embargo, la tendencia observada para los agregados húmedos es la opuesta, es decir, menores coeficientes de variación para agregados de diámetro menor.

El índice de estabilidad de agregados (IEST) indica que, como promedio, el 66 % de los agregados secos son estables en agua. Se pudo comprobar que los valores muy inferiores a esta cifra se corresponden con puntos con muy bajos contenidos de MO.

3.1.1.1 Correlación entre propiedades

Resulta de interés evaluar el valor de la correlación de Pearson entre estas propiedades físicas, químicas y físico-químicas, pues constituye un primer acercamiento cuantitativo al vínculo que en la práctica existe entre ellas. La Tabla 3.2 muestra la matriz de correlación entre un grupo de variables en las cuales se sintetizan los aspectos más relevantes de ese vínculo. El incluirlas todas conlleva a una pérdida de claridad y a cierta redundancia en la información. Así, por ejemplo, dentro del grupo de cationes se reflejan solo los coeficientes para el calcio, teniendo en cuenta la muy elevada correlación de este con el total de bases cambiables, así como la baja correlación generalizada de los otros cationes con el resto de las propiedades. En cuanto a la distribución de agregados, se muestran las fracciones de agregados secos que mejor resumen las relaciones de interés con otras propiedades.

Tabla 3.2. Correlación de Pearson entre algunas de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas medidas.

	Limo	Arcilla	MO	Ca	Da	pH(H ₂ O)	AS ₇₋₁₀	AS ₅₋₇	AS ₃₋₅	AS ₂₋₃	AS ₁₋₂	AS _{0.5-1}	AS _{0.25-0.5}
Arena	-0.116	-0.497	0.024	0.131	0.402	0.131	0.066	0.211	0.188	-0.098	-0.101	-0.252	-0.121
Limo		-0.492	0.050	0.098	-0.165	0.412	-0.003	-0.112	-0.156	0.188	0.071	0.246	0.133
Arcilla			-0.020	-0.076	-0.192	-0.284	0.007	0.005	0.014	-0.119	-0.026	-0.089	-0.088
MO				0.114	-0.378	-0.079	0.274	0.199	0.065	0.004	0.032	-0.038	-0.173
Ca					-0.301	0.316	0.124	0.011	-0.127	-0.191	-0.534	-0.422	-0.431
Da						0.121	-0.128	0.086	0.246	0.062	0.181	0.023	0.169
pH(H₂O)							0.013	0.032	0.054	0.034	-0.068	-0.059	-0.010
AS₇₋₁₀								0.428	0.080	0.014	-0.213	-0.212	-0.368
AS₅₋₇									0.742	-0.426	0.152	-0.435	-0.343
AS₃₋₅										-0.464	0.378	-0.385	-0.163
AS₂₋₃											0.007	0.710	0.367
AS₁₋₂												0.330	0.407
AS_{0.5-1}													0.712
													AS_{0.25-0.5}

Nota: En negrilla se destacan correlaciones significativas ($p < 0.01$) de relevancia para el estudio.

Las fracciones texturales muestran en general una baja correlación con el resto de las propiedades. El coeficiente más elevado es el 0.402 entre la arena y la densidad aparente, reflejando el hecho que los suelos de textura gruesa resultan por lo general más densos (Alfonso, 1985; Delgado, 1987). Dicho valor está, no obstante, influenciado por los valores extremos (en el rango alto) de densidad medidos, muy por encima de la media en la región. Lo más llamativo es la escasa relación de la arcilla con el resto de las propiedades, elemento asociado a la limitada variación de la composición textural de los suelos analizados. Su protagonismo en relación a la retención puede manifestarse a través de otras propiedades y procesos relacionados.

La materia orgánica, por otro lado, alcanza la mayor correlación con la Da (-0.38). Esta tendencia es coherente con la observada en numerosos estudios a nivel mundial (Thurrow *et al.*, 1986; Wilcox *et al.*, 1988; Nemes *et al.*, 2003; Heuscher *et al.*, 2005; Benites *et al.*, 2007; Zacharias y Wessolek, 2007; Stavi *et al.*, 2008).

Es curioso apreciar que, con relación a la agregación, ello se traduce en una correlación muy significativa con el AS₇₋₁₀ (0.274) y, en menor medida la AS₅₋₇ (0.199). Un comportamiento similar ha sido hallado recientemente por Ponce de León (2011, comunicación personal) en suelos que pertenecen a la región de estudio. Otros valores de correlación del orden de 0.3 (modularmente), vinculan a la MO con el AH_{0.25-0.5}, el CEAH y el IEST (no mostrados). Muchas de estas cifras reflejan una adecuada tendencia con respecto a lo publicado nacionalmente (Delgado, 1987; Orellana *et al.*, 1986) e internacionalmente (Tisdall y Oades, 1982; Rachid *et al.* 2001; Castro Filho *et al.*, 2002), aunque los valores son más bajos de lo esperado.

Las bajas correlaciones se asocian al parecer a los muy bajos niveles de MO medidos, una tendencia observada por van der Berg *et al.* (1997) y Mbagwu (2003) en estudios empleando suelos Ferralíticos. También Kay (1997), Rawls *et al.* (2003) y Lal y Shukla (2004), en aplicaciones de los efectos regionales de la MO sobre la agregación, arriban a similar conclusión.

Una hipótesis de tipo física para explicar los bajos coeficientes en el caso concreto de nuestros suelos parte del hecho de que, estado bajo laboreo intensivo, la MO está muy expuesta, dificultando su preservación por parte de las asociaciones órgano minerales o los propios micro o macroagregados. En esas condiciones también el régimen de agregación y la propia MO son muy variables en tiempo y espacio.

El contenido de calcio es, en cambio, una variable mucho más relacionada con el resto de las propiedades medidas. De su comportamiento se infiere la importancia de la mineralogía de las arcillas con respecto a muchos de los procesos y fenómenos que tienen lugar en el suelo. Son sobre todo de destacar sus muy significativas correlaciones con las fracciones de agregados secos más pequeñas. Como es de esperar, a elevados contenidos de calcio, relativamente bajos porcentajes de agregados pequeños. También correlaciona significativamente con los coeficientes de estabilidad de agregados secos (0.545) y húmedos (-0.357) y con el índice de estabilidad de agregados (0.351), valores estos no incluidos en la tabla.

Este catión es capaz de proporcionar agregados muy resistentes, capaces de atenuar los efectos de la erosión hídrica y de estallido de los mismos a causa del aire atrapado durante el proceso de hidratación. El resto de los cationes determinados no muestra correlaciones de interés con las variables evaluadas.

En el caso de la Da, además de sus correlaciones con la MO y la arena, ya abordadas, es curioso el patrón para con las fracciones de agregados y los coeficientes de estabilidad (estos últimos no mostrados). Las correlaciones con las fracciones de agregados secos y con el CEAS son por lo general bajas (ver Tabla3.2), en cambio las obtenidas con el $AH_{0.25-0.5}$ (0.334), el CEAH (-0.304) y el IEST (-0.332) (no mostradas) son marcadamente significativas.

Este comportamiento se relaciona con la baja estabilidad de muchos suelos Ferralíticos en húmedo, un hecho que se puede apreciar incluso visualmente cuando una muestra seca de suelo se embebe en agua. El signo de las correlaciones en ambos tipos de fracciones pasa de ser negativo, para los agregados de mayor diámetro, a positivo, para

los más pequeños. Ello coincide con lo reportado por Baumgartl y Horn (1991), Chappell *et al.* (1999); García-Oremes *et al.* (2005) y Assouline (2006), entre otros autores.

En resumen, la densidad aparente, el contenido de calcio y la composición de agregados, en particular los porcentajes de agregados más pequeños, son las variables más interrelacionadas entre sí. En cambio, un menor grado de asociación es apreciado para las fracciones texturales, el pH y la MO. El comportamiento apreciado es totalmente congruente con lo reportado en la literatura nacional e internacional, sobre todo en regiones tropicales.

3.1.1.2 Variabilidad espacial de las propiedades físicas, químicas y físico-químicas

El análisis de la variabilidad espacial de las propiedades medidas se basa fundamentalmente en la interpretación de los semivariogramas correspondientes. La representación gráfica de los mismos a la profundidad 10-15 cm se incluye en el Anexo 1 del documento. Se comprobó que las diferencias de estas relaciones en profundidad son poco apreciables. Un aspecto a destacar es el que no se perciben en ninguno de ellos patrones de anisotropía, es decir, la variabilidad espacial de las propiedades no es fuertemente dependiente de la dirección que se escoja.

Los semivariogramas obtenidos se ajustan por lo general a un modelo exponencial, mientras el alcance, o lo que es lo mismo, la distancia hasta la cual los valores de una determinada propiedad son correlacionados entre sí, varía entre los 10 y 15 km. Por encima de esa distancia se considera que los valores son aleatorios. Este comportamiento más o menos análogo de los patrones de variabilidad está en lo fundamental asociado a la geografía de la región, afectada por los accidentes que subdividen la antigua provincia en zonas relativamente homogéneas. Incluso en la llanura sur, catalogada como muy uniforme, confluyen algunos factores del clima y el relieve que contribuyen a la variabilidad de algunas propiedades importantes.

Los semivariogramas evidencian que la totalidad de las variables analizadas, con la excepción del contenido de sodio, poseen una estructura espacial bien definida. Entre ellas sobresalen la Da, la MO y la CCB (en particular el contenido de Ca), en las que el cociente entre la meseta y el residuo, un indicador del mayor o menor grado de estructura, es de 5.7, 6.2 y 5.4, respectivamente.

El hecho de que estas variables, muy vinculadas al tipo de suelo, sean las que más grado de estructuración posean, es también un reflejo de la relación entre los parámetros del semivariograma y la geografía de la región. Para el contenido de arcilla, menos

representativo de los tipos de suelos, la estructura espacial es considerablemente menor, con una varianza que aproximadamente duplica el error de determinación.

A partir de los semivariogramas descritos se regionalizan cada una de las variables consideradas utilizando el método de interpolación kriging. A manera de ejemplo la Figura 3.2 ilustra los mapas interpolados de algunas variables de interés como son el contenido de calcio, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica y los porcentajes de agregados menores de 2 mm ($AS_{<2}$) a la profundidad de 10-15 cm. Nótese que solo para la MO y el contenido de arcilla existen diferencias significativas en profundidad. Se excluye esta última variable de la figura analizada teniendo en cuenta su relativamente elevada uniformidad espacial.

En el patrón correspondiente al contenido de calcio (Figura 3.2a) destaca claramente la relación con la mineralogía de los principales agrupamientos de suelos. Se perciben también con claridad notables diferencias entre los valores medios de los suelos de la parte oeste de la llanura Habana-Matanzas, en torno a 14 cmol kg^{-1} y aquellos ubicados al este de los 360 km aproximadamente, por encima de los 19 cmol kg^{-1} . Este comportamiento no es casual; la coordenada define una frontera natural a nivel de subtipos de suelos con un amplio predominio de los Ferralíticos Rojos Típicos en la parte oeste y una zona mucho más variable en cuanto a la representatividad de subtipos en la este. Dicha variabilidad es a su vez el reflejo de la confluencia de factores del relieve y el clima que alteran la presunta homogeneidad en la región.

En el caso de la Da (Figura 3.2b) lo más llamativo es el comportamiento anómalo de los valores en el extremo suroeste de la región de estudio, elemento al que se había hecho referencia anteriormente, con una media que oscila en torno a 1.7 g cm^{-3} . En el resto de la región gran parte del gradiente espacial se explica también a partir de los agrupamientos de suelos. También en torno a los 360 km de la coordenada este se observa un cambio abrupto en el comportamiento de esta propiedad.

El comportamiento espacial de la MO (Figura 3.2c) es más difícil de explicar debido probablemente al decisivo impacto del manejo en la variabilidad de la MO. Llamam la atención principalmente los bajos niveles de MO en el extremo noroccidental de la región de muestreo, zona de transición entre suelos Ferralíticos y Pardos, y en la franja más al este de la Cordillera Bejucal Madruga Coliseo, también dominada por suelos Pardos.

Por último, es de interés evidenciar que el patrón del $AS_{0.25-2}$ (Figura 3.2 d) poco tiene que ver con el del resto de las propiedades medidas. Es este el término sujeto a mayor nivel de variabilidad a nivel de Ferralíticos. En particular, relevantes contrastes se manifiestan

en la porción occidental de la llanura Habana Matanzas, un hecho que al parecer tiene importantes implicaciones en términos de la curva de retención.

Existen muchos otros aspectos de interés relacionados con la distribución espacial de las propiedades involucradas. No obstante, no es objetivo de esta tesis llevar a cabo una descripción pormenorizada de ellas, salvo cuando se requiere para destacar algún elemento relevante del comportamiento de las CRHS.