

Figura 3.2. Mapas de las propiedades del suelo Ca, Da, MO y AS_{0.25-2} regionalizadas.

3.1.2 Descripción de las curvas de retención de humedad

La Tabla 3.3 muestra el comportamiento estadístico de la humedad volumétrica a cada uno de los potenciales, así como los parámetros del modelo analítico de van Genuchten (1980) θ_s , θ_r , α y n , que mejor se ajustan a las CRHS medidas.

Llama la atención la mayor desviación respecto a la media de la humedad a potenciales bajos (entre -30 y -1500 kPa); ello da como resultado un incremento casi lineal del coeficiente de variación entre un 12% y un 24% para la humedades comprendidas entre -1 kPa y -1500kPa, respectivamente. Para la humedad gravimétrica también se observa un incremento similar de este coeficiente, pero menos acentuado.

Tabla 3.3. Comportamiento estadístico de los valores de humedad volumétrica medidos a cada uno de los potenciales matriciales (kPa) que conforman la CRHS y de los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten (1980) empleado para la curva.

	θ_{V_h}	N	Mín.	Máx.	Media	D.est.			N	Mín.	Máx.	Media	D.est.
Humedad volumétrica (cm ³ cm ⁻³)	$\theta_{V_{-1}}$	229	0.327	0.784	0.526	0.066	Parámetros de van Genuchten (1980)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	229	0.330	0.786	0.533	0.068
	$\theta_{V_{-5}}$	229	0.320	0.780	0.508	0.067		θ_r (cm ³ cm ⁻³)	229	0.010	0.400	0.208	0.129
	$\theta_{V_{-10}}$	229	0.292	0.774	0.492	0.071		α (cm ⁻¹)	229	0.001	0.100	0.026	0.032
	$\theta_{V_{-30}}$	229	0.240	0.771	0.454	0.085		n	229	1.035	4.500	1.683	0.931
	$\theta_{V_{-100}}$	229	0.204	0.611	0.408	0.081							
	$\theta_{V_{-300}}$	229	0.081	0.567	0.369	0.088							
	$\theta_{V_{-1000}}$	229	0.043	0.527	0.346	0.083							
	$\theta_{V_{-1500}}$	229	0.041	0.514	0.340	0.081							

Como refleja la Figura 3.3 no existen grandes diferencias entre la CRHS que toma en cuenta la media de todos los valores de humedad y la curva media por profundidades. Únicamente a los potenciales más bajos, de -1000 y -1500 kPa se aprecia que la humedad a los 10-15 cm es ligeramente inferior. Estas diferencias aunque pequeñas, son estadísticamente significativas, y responden fundamentalmente a las diferencias en los contenidos de arcilla a una y otra profundidad, aspecto antes abordado.

Mediante el ajuste de las curvas al modelo de van Genuchten se obtuvo un $R^2=0.958$, un $EM=0.002$ cm³ cm⁻³ y un valor de la $RECM= 0.017$ cm³ cm⁻³, evidenciando una muy buena correspondencia con los valores medidos. La calidad del ajuste es un elemento fundamental a la hora de minimizar la incertidumbre de los modelos de simulación (van Genuchten *et al.*, 1991; Hillel, 1998; Tomasella *et al.*, 2003; Cornelis *et al.*, 2005) en aplicaciones agrohidrológicas.

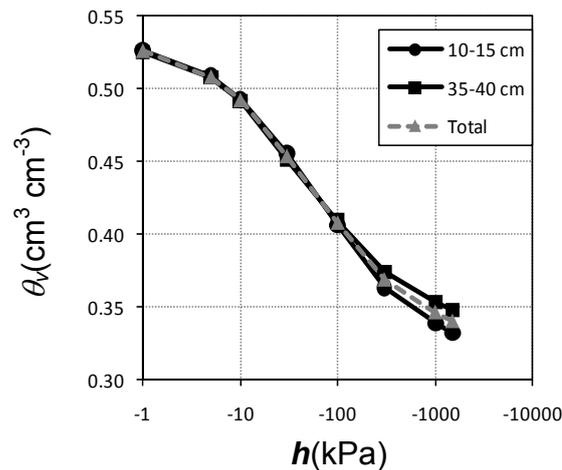


Figura 3.3. CRHS conformadas por los valores de humedad promedio.

El resultado concuerda perfectamente con los obtenidos en estudios de alcance nacional e internacional. Para Ruiz y Utset (1992) el modelo de van Genuchten es superior a otras relaciones de su tipo para describir las propiedades hidro-retentivas de los suelos de Cuba. Cornelis *et al.* (2005) obtuvieron un valor de $R^2=0.982$ y una $RECM=0.010 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mientras Tomasella *et al.* (2003) hallaron una $RECM =0.013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en ajustes similares para suelos de Bélgica y Brasil, respectivamente.

3.1.2.1 Curva de retención de humedad por tipos de suelos

La Tabla 3.4 refleja los valores medios de humedad para cada uno de los potenciales por agrupamientos de suelos de la región. A la derecha de cada valor se incluye el resultado de la prueba de comparaciones múltiples a partir de una ANOVA simple.

Tabla 3.4. Prueba de comparaciones múltiples entre las curva de retención de humedad media por tipos de suelos muestreados.

Tipos de Suelos	N	$\theta_v \text{ (cm}^3 \text{ x cm}^{-3}\text{) a los potenciales matriciales (kPa)}$							
		-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
Ferralítico Amarillo	30	0.490 ^b	0.476 ^b	0.455 ^b	0.393 ^{ab}	0.352 ^{ab}	0.330 ^{ab}	0.312 ^{ab}	0.307 ^{ab}
Ferralítico Rojo	129	0.511 ^b	0.490 ^{bc}	0.473 ^{bc}	0.436 ^{bc}	0.400 ^{bcd}	0.372 ^{abc}	0.353 ^{ab}	0.348 ^{ab}
Fersialítico Pardo Rojizo	8	0.548 ^{bc}	0.546 ^{cde}	0.544 ^{def}	0.535 ^{de}	0.508 ^f	0.466 ^c	0.418 ^b	0.404 ^b
Gley Ferralítico	3	0.410 ^a	0.394 ^a	0.380 ^a	0.347 ^a	0.300 ^a	0.286 ^a	0.280 ^a	0.279 ^a
Húmico Carbomático	2	0.590 ^{cd}	0.559 ^{de}	0.537 ^{cdef}	0.495 ^{cd}	0.451 ^{cdef}	0.416 ^{bc}	0.383 ^{ab}	0.373 ^{ab}
Húmico Marga	4	0.522 ^{bc}	0.511 ^{bcd}	0.490 ^{bcd}	0.409 ^{ab}	0.351 ^{ab}	0.329 ^{ab}	0.318 ^{ab}	0.315 ^{ab}
Osc.Plás. Gleyzado	4	0.597 ^d	0.595 ^e	0.594 ^f	0.587 ^e	0.495 ^{ef}	0.371 ^{abc}	0.346 ^{ab}	0.339 ^{ab}
Osc.Plás. no Gleyzado	6	0.519 ^b	0.488 ^{bc}	0.462 ^b	0.407 ^{ab}	0.366 ^{abc}	0.341 ^{ab}	0.319 ^{ab}	0.313 ^{ab}
Pardo con Carbonatos	33	0.601 ^d	0.588 ^e	0.576 ^{ef}	0.547 ^{de}	0.474 ^{def}	0.399 ^{abc}	0.366 ^{ab}	0.358 ^{ab}
Rendzina Roja	8	0.546 ^{bcd}	0.532 ^{bcd}	0.516 ^{bcd}	0.479 ^{bcd}	0.414 ^{bcd}	0.343 ^{ab}	0.325 ^{ab}	0.321 ^{ab}

Nota: En cada columna letras diferentes indican medias que difieren significativamente ($p < 0.05$).

Entre los valores de humedad media hay diferencias significativas a todos los potenciales. Sin embargo estas diferencias son muy superiores para los potenciales próximos a la saturación. Para -1000 y -1500 kPa el procedimiento solo es capaz de distinguir dos

subconjuntos de valores medios, en tanto para los potenciales entre -1 y -100 kPa los separa hasta en seis subconjuntos.

El comportamiento de las humedades promedios se adecua muy bien a lo esperado, al menos para los suelos bien representados. Los suelos Ferralíticos Rojos y Amarillos poseen una relativamente baja humedad de saturación, en tanto los Pardos con Carbonatos sobresalen por tener la más alta humedad en ese rango. A medida que decrece el potencial las diferencias entre unos y otros suelos se hacen mucho menos acentuadas. Los Pardos se caracterizan precisamente por retener elevados contenidos de humedad, aun a bajos potenciales, en tanto los Ferralíticos Rojos y Amarillentos pierden mucha humedad a esos potenciales. De ahí el buen drenaje en estos suelos. En la Figura 3.4 se ilustran las CRHS a partir de los valores medios de humedad para cada uno de estos tres agrupamientos. De ellas es fácil corroborar las marcadas diferencias que presentan, como promedio, en cuanto a la disponibilidad de agua para las plantas.

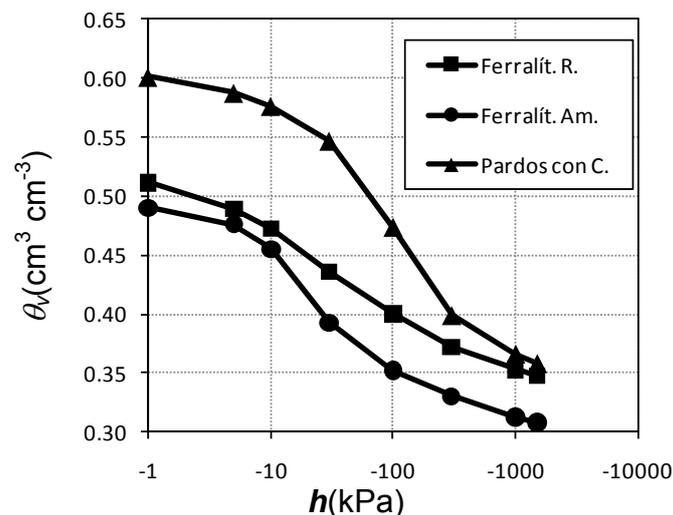


Figura 3.4. Curvas de retención de humedad promedio de los agrupamientos de suelos más representados en el muestreo: Ferralíticos Rojos, Ferralíticos Amarillentos y Pardos con Carbonatos.

3.1.2.2 Correlación entre las CRHS y las propiedades medidas

La Tabla 3.5 resume las principales correlaciones de la humedad volumétrica con el resto de las variables del suelo medidas como parte del estudio. Al igual que con anterioridad (Tabla 3.2) se decidió no mostrar todas las variables involucradas en aras de ganar en claridad, sino solo aquellas sobre las cuales se desean realizar algunas acotaciones.

Las correlaciones entre las fracciones texturales y el contenido de humedad a los distintos potenciales se encuentra en un rango medio. Delgado (1987) demuestra que la mayoría de las propiedades de los suelos Ferralíticos Rojos de Cuba no son explicables cuando se

analizan solamente sobre la base de su composición mecánica y las características de los minerales arcillosos predominantes.

Tabla 3.5. Correlaciones de la curva de retención de la humedad con varias de las propiedades medidas.

Propiedad	θ_v (cm ³ x cm ⁻³) a los potenciales matriciales (kPa)							
	-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
Arena	-0.262	-0.248	-0.249	-0.257	-0.301*	-0.347	-0.391	-0.402
Limo	0.003	-0.023	-0.039	-0.051	-0.054	-0.059	-0.054	-0.049
Arcilla	0.190	0.210	0.227	0.245	0.273	0.308	0.320	0.319
MO	0.281	0.274	0.255	0.223	0.219	0.221	0.213	0.207
Ca	0.613	0.656	0.656	0.544	0.466	0.414	0.323	0.309
Da	-0.589	-0.515	-0.462	-0.405	-0.310	-0.325	-0.330	-0.328
CEAS	-0.423	-0.450	-0.457	-0.372	-0.339	-0.310	-0.267	-0.252
IEST	0.392	0.318	0.296	0.271	0.265	0.270	0.272	0.270
Log(AS ₁₋₂)	-0.420	-0.457	-0.488	-0.488	-0.440	-0.395	-0.338	-0.317
Log(AS _{0.5-1})	-0.436	-0.505	-0.515	-0.422	-0.354	-0.306	-0.249	-0.230
Log(AS _{0.25-0.5})	-0.531	-0.569	-0.591	-0.551	-0.500	-0.456	-0.395	-0.372

* En negrilla se resaltan las correlaciones superiores a 0.3

En particular se debe resaltar la significación estadística entre la humedad a bajos potenciales con los contenidos de arena y arcilla. Las tendencias determinadas por el signo de las correlaciones son en ambos casos lógicas. Una vez que la humedad decrece y el tamaño de poros se hace más pequeño, la influencia de la arcilla en la humedad se incrementa (Hall *et al.*, 1977, Reatto *et al.*, 2001).

El poder predictivo de la arcilla en muchos estudios bajo suelos tropicales contrasta con el elevado peso de esta fracción en diversas aplicaciones en suelos templados. Delgado (1987) no encontró correlación de la arcilla con los valores de humedad a capacidad de campo en suelos Ferralíticos Rojos de la antigua La Habana. van den Berg *et al.* (1997) tampoco obtuvieron una dependencia marcada con la humedad a -33 kPa, en un estudio que involucró únicamente suelos tropicales. En igual sentido se pronunciaron Cinchota y van Lier. (2004) para humedades en un rango de potenciales entre los -1 a -100 kPa. Sin embargo, para Tomasella *et al.*, (2003) la arcilla es un predictor de la humedad de los suelos de Brasil solo a los potenciales de -100 y -1500 kPa.

Un resultado interesante es que las correlaciones con las fracciones texturales no están ligadas al esquema de clasificación empleado, en este caso el de la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Con la utilización de otros esquemas de clasificación, como el de la ISSS (Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) no se aprecia diferencias en los valores de correlación. Tietje y Tapkenhinrichs (1993), Scheinost *et al.* (1997) y Nemes y Rawls (2006) arribaron al mismo resultado.

Las correlaciones parecen no estar tampoco afectadas por las distintas metodologías de cálculo dentro de un mismo esquema de clasificación, en este caso el de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA). El empleo del método de Bouyoucos (1962), que modifica en determinado grado los cálculos con respecto al de Gee y Or. (2002), usado en el trabajo de tesis, tampoco dan lugar a variaciones sensibles en los resultados (García *et al.*, 2008).

La dependencia de los valores de humedad con la MO para todo el conjunto de valores es también inferior a lo esperado. Este hecho se asocia fundamentalmente a los bajos contenidos de MO de las muestras empleadas. Cuando se analizan las correlaciones por profundidad, los valores con la humedad a -1 y -5 kPa a 10-15 cm se hacen significativos. Para 35-40 cm los valores son próximos a cero. En igual sentido se han pronunciado Lal (1979), Danalatos *et al.* (1994) y Puckett *et al.* (1985), quienes también perciben un limitado valor predictivo en la MO. Las correlaciones pueden también estar influenciadas no solo por la cantidad, sino también por su calidad de la materia orgánica.

Un papel mucho más marcado en la retención de humedad de los suelos de la región de estudio se le atribuye a la CCB, y en particular al contenido de Ca. Ambas siguen la misma tendencia, pero los valores con la CCB suelen ser ligeramente inferiores. El contenido de Ca es particularmente influyente en la humedad a los altos potenciales, llegando incluso a ser aproximadamente 0.66 para -5 y -10 kPa, lo cual representa un 43 % de la variabilidad total. El calcio es muy importante en la formación de los complejos órgano minerales, realiza el enlace y determina también la forma de la estructura de los suelos al cumplir con su doble función, coagulante y cementante, lo cual explica este comportamiento.

De acuerdo con Delgado (1987), en la composición de los ácidos húmicos de los suelos Ferralíticos predomina la fracción ligada a los metales alcalinotérreos, principalmente el Ca. No obstante, son escasos los trabajos en la literatura que relacionan directamente la humedad con el contenido de calcio. Algunos estudios involucran la CCB y en mayor medida la CIC, y en todos ellos se confirman las tendencias encontradas en este estudio. Arrouays y Jamagne (1993) hallan a la CCB directamente relacionada con la humedad a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente. Para Packepsky y Rawls (1999) la CIC de la fracción arcilla es un predictor esencial de la humedad a -33 y -1500 kPa y Hodnett y Tomasella (2002) emplean la CIC de suelos de Brasil en el desarrollo de PTF paramétricas.

Las correlaciones de la θ_v con la D_a , en particular elevadas para los potenciales altos (en torno a -0.6), se ajustan adecuadamente a los reportes de la literatura y justifican su uso extendido en el desarrollo de PTF hidráulicas. En este caso alcanza a explicar un 35% de la variabilidad de la humedad en este rango de potenciales. La densidad aparente está íntimamente ligada a la porosidad total, y esta a su vez a la humedad de saturación. Tendencias similares se han encontrado en suelos tropicales (Delgado, 1987; Benítez 1990; van den Berg *et al.*, 1997) y no tropicales (Aina y Periaswamy 1985; Ozdemir *et al.*, 2000; Reeve *et al.*, 2006; Stavi *et al.*, 2008)

Resulta llamativo que la correlación de esta variable con la humedad gravimétrica a -1 kPa es de -0.825, es decir, casi por sí sola predice correctamente su valor. La gran diferencia entre este valor de correlación y el -0.586 con la humedad volumétrica a igual potencial, evidencia la marcada incertidumbre asociada a las mediciones de la densidad aparente. Tómese en cuenta la relación entre estas variables (Ec. 1.2).

En el caso de las correlaciones con las variables vinculadas a la composición de agregados son destacables los elevados coeficientes que se alcanzan con el logaritmo del porcentaje de agregados secos menores de 2 mm, en particular con el $AS_{0.25-0.5}$ y el AS_{1-2} , así como con su coeficiente de estabilidad (CEAS). La más fuerte correlación es el -0.59 alcanzado entre el $AS_{0.25-0.5}$ y la humedad a -10 kPa. Delgado (1987) destaca el papel primordial que juegan la estructura y la estabilidad de agregados de los suelos Ferralíticos Rojos en la retención de humedad a los altos potenciales de la curva.

A estos valores de correlación estadísticamente significativos ligados a la composición de agregados mostrados se suman otros de las fracciones análogas de agregados húmedos. Estos no se muestran teniendo en cuenta que responden mayoritariamente a la fuerte dependencia entre ambos tipos de agregados. Los agregados de mayor tamaño, en cambio, apenas poseen influencia en el potencial retentivo de estos suelos. Para que se tenga una idea, la correlación máxima con los porcentajes de agregados secos entre 2 y 10 mm es de -0.262.

De acuerdo a los valores de la Tabla 3.5 a mayor predominio de pequeños agregados (< 2 mm), menor retención de humedad de los suelos, principalmente para potenciales cercanos a la saturación. Aunque ello no significa de por sí un nuevo hallazgo, quizás por primera vez en Cuba se demuestra de manera tan fehaciente este resultado. Una mayor representatividad de estas fracciones conlleva a una composición de poros un tanto similar a la de un suelo de textura más gruesa, con lo cual favorece el drenaje. Nótese que las correlaciones con la arena, ya abordadas, son también significativas, pero

principalmente para las humedades a los potenciales más negativos. Valores de correlación negativos entre el diámetro de agregados pequeños y la humedad han sido reportados en los trabajos de Coote *et al.* (1988) y Perfect *et al.* (1990).

Un análisis más a fondo de la dependencia entre las CRHS y las propiedades medidas a través de la correlación de Pearson, estuvo enfocado a distinguir el grado de asociación en suelos Ferralíticos y no Ferralíticos. Entre estos últimos no se concibieron subdivisiones adicionales teniendo en cuenta la limitada representatividad de los agrupamientos de suelos, exceptuando quizás la de los Pardos. Considerando solo los suelos Ferralíticos la influencia del contenido de arena y arcilla en la retención crece, aunque discretamente, dado el ligero incremento de las correlaciones en torno a un 6 %. Se aprecia además un decrecimiento de las correlaciones con el logaritmo de las fracciones de agregados pequeños, y principalmente con la Da. Las correlaciones con el Ca apenas varían con respecto a las de la Tabla 3.5.

Para los no Ferralíticos aumentan sustancialmente las correlaciones con la Da, llegando a ser - 0.71 para la humedad a -1 kPa. Se acentúan también, aunque ligeramente, las correlaciones con el $AS_{0.25-0.5}$, pero decrecen con las otras fracciones consideradas en la Tabla 3.5. En tanto, disminuye sensiblemente la dependencia con la arcilla; las correlaciones en este caso no superan el valor de 0.19. Las correlaciones con el contenido de Ca parecen ser las menos afectadas por la subdivisión entre suelos, un elemento más a favor de esta variable.

En resumen, en este estudio se incorporan la CCB (y en general los contenidos de cationes), la composición del tamaño de agregados, y el pH como posibles propiedades de suelos no tradicionales de estimación de las CRHS. De ellas solo el pH parece no tener una influencia destacada en la propiedad hidráulica analizada. Las otras dos no solo influyen, sino que más bien dominan por sobre otras propiedades tradicionales como la textura y la MO. En el caso particular de la composición del tamaño de agregados son los porcentajes agregados de menor tamaño los que determinan esta fuerte influencia en la retención hídrica.

Ello demuestra la incoherencia de muchas de las funciones de pedotransferencia más extendidas a nivel mundial (Lal y Fausey, 1993; Zhang, 1994; Mapa, 1995; Wall y Heiskanen, 2003; Abid y Lal, 2009) y a la vez corrobora una hipótesis fundamental del trabajo desarrollado: la incorporación de otras variables es un prerrequisito para la correcta estimación de las curvas.

Una apreciación, independiente de si se tiene en cuenta o no la subdivisión por suelos, es que las correlaciones para las humedades a elevados potenciales son por lo general más altas, y por lo tanto son más fácilmente estimables. Solo para el contenido de arcilla y la arena se observa un incremento de las correlaciones (modularmente hablando) a medida que disminuye el potencial. Esto tiene consecuencias importantes en la incertidumbre de las estimaciones para las humedades entre -100 y -1500kPa.

3.1.2.3 Correlación espacial cruzada

Un aspecto escasamente abordado en la literatura, pero de gran interés, es el grado de correlación espacial entre las CRHS y las propiedades de suelo (Romano y Palladino, 2002). Ello se debe a que muchas de las aplicaciones que vinculan las propiedades de suelo de un tipo y otro se apoyan en la información disponible en bases de datos elaboradas con fines diversos, sin que se pueda tener en cuenta la correspondencia espacial.

En el estudio se lleva a cabo este tipo de análisis con el auxilio de los semivariogramas cruzados, los cuales permiten cuantificar el grado de asociación lineal existente entre los valores de pares de variables separados a una distancia dada. La Figura 3.5 muestra los semivariogramas cruzados entre la primera componente principal de la humedad a los distintos potenciales (CP1) y algunas de las propiedades de suelo más espacialmente correlacionadas. Como con anterioridad se muestran solo los correspondientes a la profundidad 10-15 cm.

Como se puede apreciar de esta figura, el alcance o la distancia sobre la cual existe correlación espacial cruzada entre pares de valores de diferentes propiedades, varía también entre los 10 y 15 km. Al igual que en el análisis anterior se observa un fuerte grado de asociación entre los porcentajes de agregados menores de 2 mm, en particular el $AS_{0.25-0.5}$ y las CP1, no así con los porcentajes para diámetros mayores de 2 mm. También el IEST, el CEAS y el CEAH muestran una fuerte estructura espacial con la humedad a ambas profundidades.

Nótese que esto tiene un alcance que va mucho más allá de la simple correlación lineal entre las variables. Demuestra que en los suelos de la región un cambio determinado de la variable independiente, en este caso el por ciento de agregados, se traduce en un cambio equivalente de la curva de retención de humedad. De por sí es un hallazgo importante, rara vez abordado en la literatura internacional debido a la no disponibilidad de suficiente información.

También la densidad aparente, la materia orgánica y el contenido de calcio (Figura 3.5 b, c y d) reflejan una marcada estructura espacial cruzada con la CRHS a la primera profundidad. A diferencia de la Da y el Ca, la MO se manifiesta un fuerte grado de asociación a 35-40 cm. No obstante, lo más curioso es precisamente esta dependencia con la MO en el horizonte superficial.

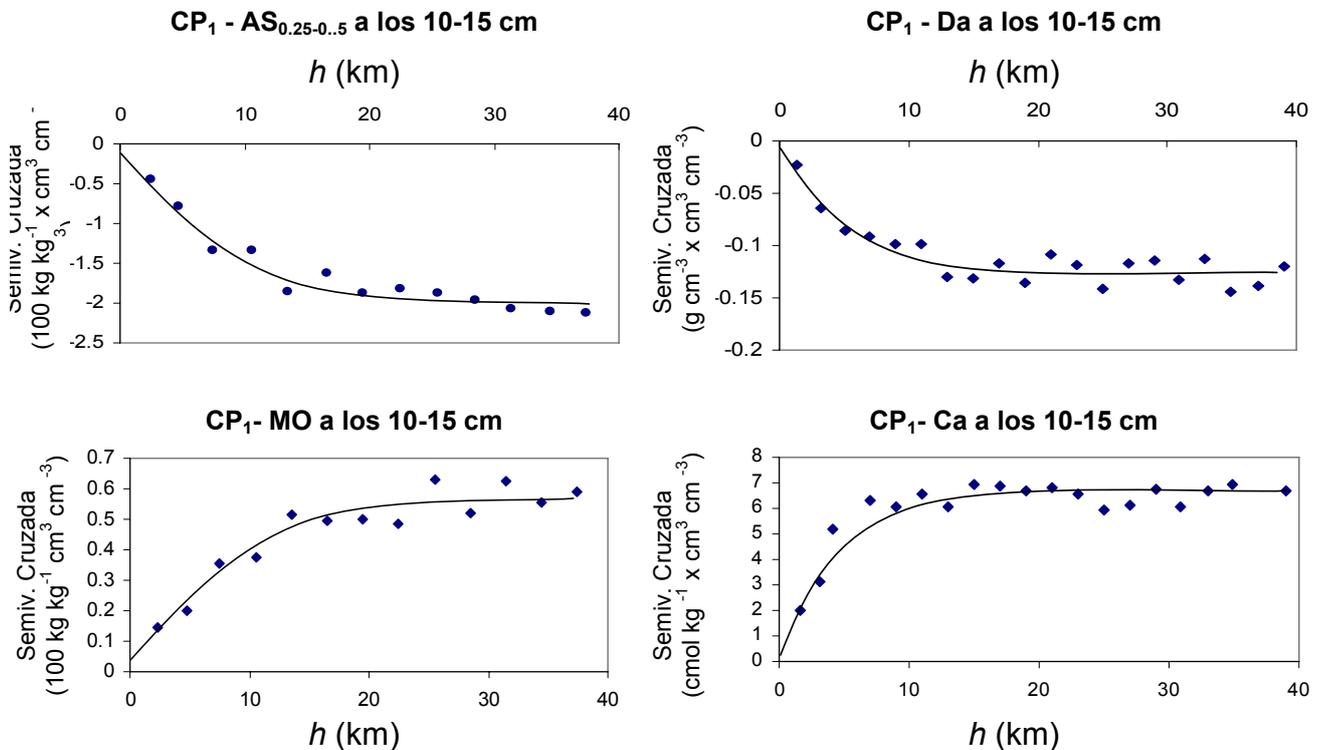


Figura 3.5. Semivariogramas cruzados entre variables del suelo y la humedad volumétrica a los 10-15cm.

Anteriormente se había mostrado que el conjunto de todos los datos no evidenciaba significativas correlaciones entre la MO y las humedades a los distintos potenciales. Sin embargo la Figura 3.5c evidencia que para los pares de puntos separados a distancias menores de 15 km aproximadamente existe una clara estructura espacial entre los valores de MO y la CP1. Un valor de semivarianza cruzada bajo es indicativo de una elevada correlación de los valores de las variables en ese rango de distancias. La conclusión es que aunque la MO no es una variable globalmente correlacionada con la CRHS, sí lo es localmente. Una posible causa de este comportamiento es que a pequeñas escalas el manejo suele ser más o menos homogéneo y por lo tanto altera menos la dependencia, digamos natural, entre la MO y el grado de retención. Ello explicaría igualmente el que apenas se aprecie estructura a 35-40 cm.

¿Qué importancia tiene el conocer qué variables poseen estructura espacial con el grado de retención de humedad? El conocer el patrón de correlación espacial cruzada es muy

útil a hora de estimar el valor de la propiedad de interés, en este caso la CRHS a través de la CP1, en puntos no medidos. Ello permite, por ejemplo, emplear métodos geoestadísticos como el cokriging (Hengl *et al.*, 2004; Herbst *et al.*, 2006), en el que, conociendo el comportamiento de la variable dependiente en un número relativamente elevado de puntos, y con poca información de la variable dependiente, se puede obtener un patrón interpolado de esta última. Otras técnicas de interpolación que ahora podrían ser aprovechadas son el co-kriging, el co-kriging con variable colocalizada, entre otras.

Un ejercicio interesante sería el poder demostrar con ejemplos numéricos el beneficio que ello representaría en términos de reducción de la incertidumbre de las estimaciones. En cambio, ello está más allá de los objetivos fundamentales de este trabajo de tesis.

3.2 Relación entre agrupamientos curvas de retención y los de suelo

Una interrogante muy difundida entre muchos de los investigadores vinculados a la hidrología de los suelos es cuán acentuada podría ser la variabilidad de las propiedades de retención en esta región, caracterizada por una distribución relativamente homogénea de suelos. En particular es de interés el comportamiento del área cubierta por los suelos Ferralíticos, eminentemente llana, relativamente uniforme, y con un peso fundamental en la agricultura. El presente estudio permite dar respuesta a esa interrogante.

3.2.1 Agrupamiento espacial de las curvas de retención de humedad

Aquí se puede apreciar en la Figura 2.8b y 2.8c el volumen y la diversidad de formas de las CRHS representadas es amplia. De ahí que, el poder separar grupos de curvas con un patrón bien definido constituye una tarea compleja, aun con el empleo de herramientas matemáticas y computacionales. En la identificación de patrones de curvas es importante considerar la humedad de saturación como un indicador del corrimiento de la curva en el eje de las humedades. Pero a su vez es vital tener en cuenta la forma de la curva, es decir el patrón de pendientes, como un rasgo distintivo asociado a los suelos.

Una herramienta muy útil para tales fines es el empleo del análisis Conglomerados Jerárquicos (ver especificaciones del método en el epígrafe 2.4.3.1). No obstante, el análisis de conglomerados sobre la totalidad de la curvas, si bien permite apreciar las tendencias fundamentales en cuanto a los patrones predominantes, solo logra identificar de manera eficiente aquellos agrupamientos de curvas con rasgos muy marcados. Es decir, hay varios grupos, sobre todo los muy representados, que se pudieran catalogar como afectados por curvas cuya pertenencia a ellos parece discutible.

El incremento del número de conglomerados no resuelve esta dificultad. Supóngase un agrupamiento compuesto por dos subconjuntos de curvas con patrones medianamente diferentes, más una curva con un comportamiento anómalo con relación al resto. A los efectos de la técnica multivariada un nuevo conglomerado contendría únicamente esa curva “anómala”, por ser la de menor proximidad matemática.

Es por ello se valoró la conveniencia de aplicar el procedimiento de conglomeración en varias etapas. En una primera etapa se realizó el análisis tomando solo las curvas de aquellos puntos (164 en total) cuyos suelos están clasificados como Ferralíticos. De ella se pudieron identificar tres agrupamientos con patrones muy bien definidos, los cuales se muestran en la Figura 3.6. Otros dos agrupamientos apenas estuvieron representados, uno con dos curvas y otro con solo una, y por ello se obviaron.

El agrupamiento C.1 se caracteriza por una humedad de saturación próxima a $0.53 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y un decrecimiento casi lineal de la humedad con el potencial, de manera que la humedad residual promedio es de aproximadamente el 70% de la saturada. Este tipo de curvas es atribuible a suelos con muy buen drenaje, pero en los que pérdida de humedad es gradual, sin un predominio marcado de un diámetro de poros sobre otros. Para el C.2 la humedad de saturación promedio es más elevada. Está conformada por CRHS en los que la diferencia entre la humedad de saturación y la humedad residual, y por ende el agua disponible para las plantas, es baja. Estos suelos apenas sufren pérdidas de agua hasta aproximadamente los 100 kPa, dificultando con ello el drenaje. Por lo general se ubican en áreas de transición hacia zonas donde prevalecen suelos de arcilla 2:1, de ahí el que sean menos representativos.

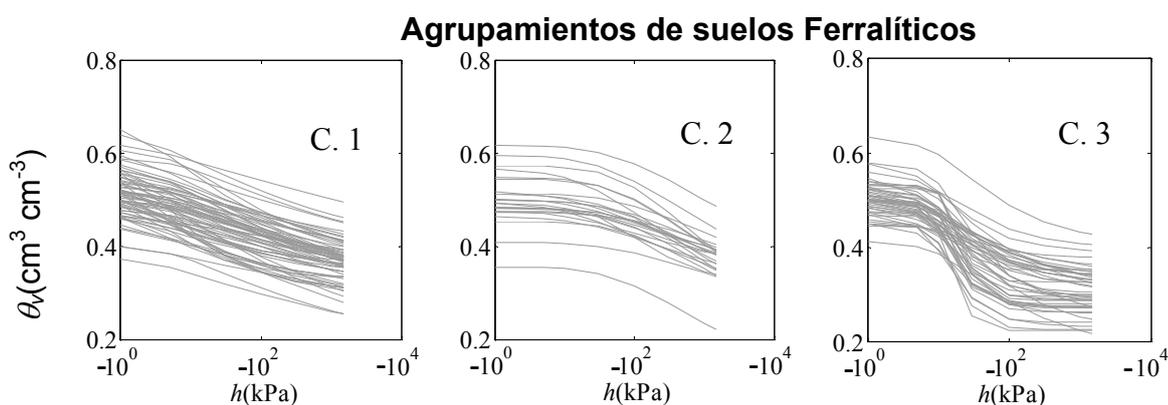


Figura 3.6. Principales agrupamientos de las CRHS obtenidos después de aplicar la técnica de Conglomerados Jerárquicos sobre aquellos suelos clasificados como Ferralíticos.

Por último las curvas del C.3 describen lo que los físicos de suelos suelen llamar como forma de “S”, debido a la clara presencia de un punto de inflexión. Es un patrón similar al

de los suelos arenosos, indicativo de buena microagregación que, a su vez facilita el drenaje. Poseen una humedad de saturación promedio de aproximadamente $0.51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, significativamente (en el sentido estadístico) inferior a la de C.1 y C.2. A potenciales relativamente altos, alrededor de los -30 kPa , y en un rango estrecho de estos, pierden una cantidad considerable de humedad. Ello es reflejo del peso relativamente superior que tienen en estos suelos los poros grandes y medios por sobre los pequeños. Sobre ello se profundizará en el siguiente epígrafe.

Con posterioridad se aplicó la misma herramienta matemática sobre los restantes puntos, los no clasificados como Ferralíticos. Por su mayor heterogeneidad se conformaron siete agrupamientos, cinco de ellos con niveles similares de pertenencia, más dos apenas representados, que igualmente no se tuvieron en cuenta. La representación gráfica de esos cinco agrupamientos se puede apreciar en la Figura 3.7.

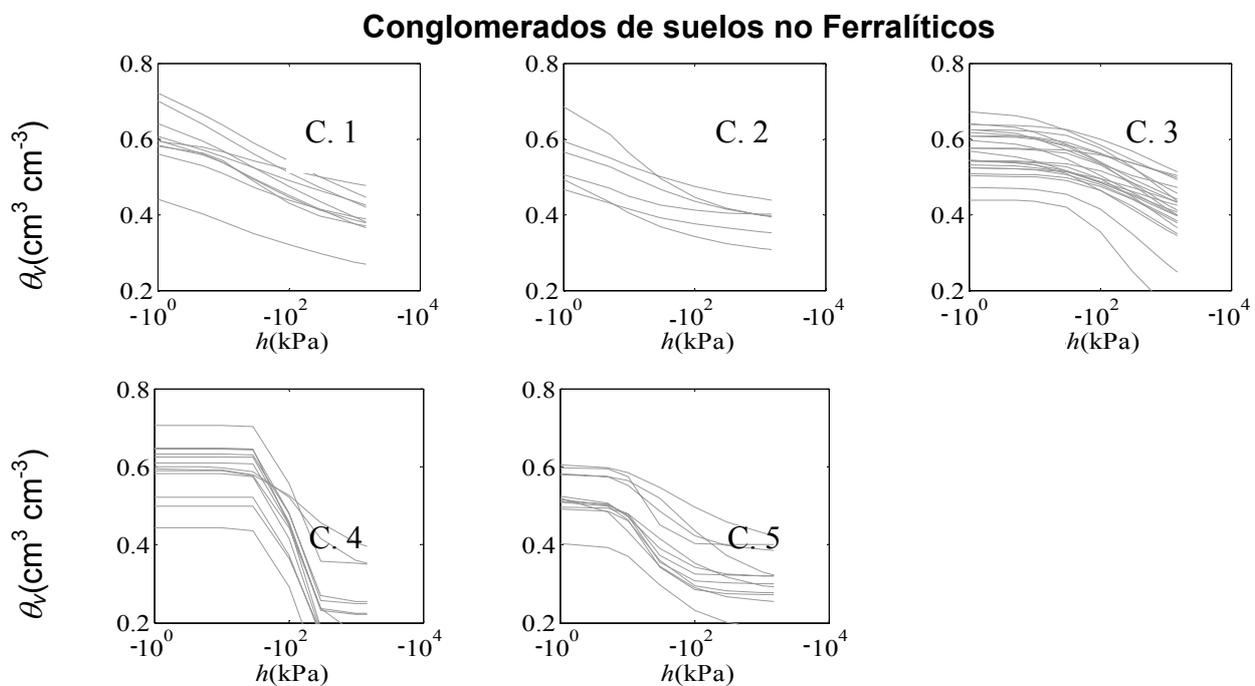


Figura 3.7. Principales agrupamientos de las CRHS obtenidos después de aplicar la técnica de Conglomerados Jerárquicos sobre aquellos suelos clasificados como no Ferralíticos.

Nótese que de estos cinco grupos, tres de ellos se pueden incorporar casi íntegramente a los obtenidos en la primera fase. El agrupamiento C.2, el C.3 y el C.5 de los no Ferralíticos siguen los mismos patrones de forma que el C.1, el C.2 y el C.3, respectivamente, para los Ferralíticos. Lo que es más importante, se comprobó que la ubicación de los puntos correspondientes a esas curvas es perfectamente coherente con la distribución espacial de los agrupamientos C.1, C.2 y C.3 de los Ferralíticos. Aunque no se localizan específicamente sobre un Ferralítico de acuerdo al mapa de suelos utilizado,

sí se hallan dentro de la extensa llanura donde predomina este tipo de suelos (Ver Figura 2.3).

La nueva configuración de los tres agrupamientos principales de los Ferralíticos (Figura 3.6), complementada con los conglomerados análogos correspondientes usando suelos clasificados como no Ferralíticos (Figura 3.7) se muestra en la Figura 3.8. El que el patrón general de cada agrupamiento apenas se afecte demuestra el nivel de semejanza entre los conglomerados. Nótese que el agrupamiento menos representado de los Ferralíticos, el C.2, es a su vez el que más contribuciones recibe de entre los no Ferralíticos. Se debe fundamentalmente al aporte de un amplio número de puntos que se encuentran en la frontera entre suelos Ferralíticos y los Pardos, a todo lo largo de la parte norte de la región.

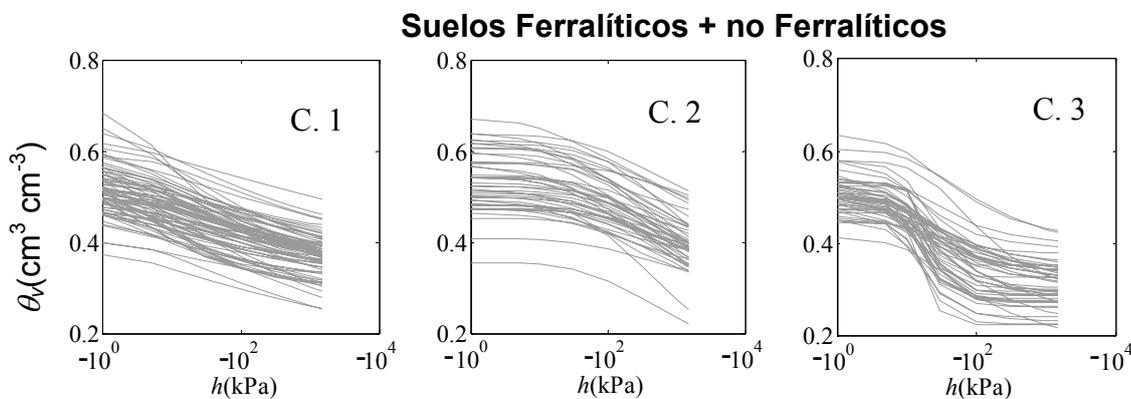


Figura 3.8. Unión de los agrupamientos principales para suelos Ferralíticos (Figura 3.6) con agrupamientos análogos obtenidos para los no Ferralíticos (Figura 3.7).

En la Tabla 3.6 se puede apreciar lo que se conoce como “Tabla de Contingencia”, conformada en las filas por el tipo de suelos asociados y, en las columnas, por el agrupamiento al que pertenecen las curvas. Nótese que los agrupamientos C.1 y C.3 están apenas influenciados por curvas de otros suelos, a diferencia del C.2, en el cual hay una incidencia importante de suelos clasificados como Pardos y como Ferralíticos, en lo fundamental. Es un resultado esperable atendiendo a la distribución espacial de los puntos que contribuyen a este agrupamiento.

También Klimes *et al.* (1980) y Herrera *et al.* (1989) encuentran una composición genética muy diversa al agrupar los suelos de Cuba, apoyados en criterios que de algún modo tienen en cuenta el grado de retención del agua. Estos criterios, fundamentados en la relación entre higroscopicidad y cantidad de arcilla, no son suficientes a la hora de diferenciar los comportamientos de retención descritos.

Tabla 3.6. Tabla de contingencia que relaciona los tipos de suelos muestreados y los agrupamientos de curvas de retención obtenidos.

	C.1	C.2	C.3	Total
Ferralítico Amarillento	7	5	16	28
Ferralítico Rojo	66	20	35	121
Fersialítico	0	8	0	8
Húmico Marga	1	0	0	1
Oscuro Plástico Gleyzado	0	2	0	2
Oscuro Plástico no Gleyzado	1	1	0	2
Pardo con Carbonatos	3	10	2	15
Rendzina Roja	1	2	0	3
Total	79	48	53	180

A partir de esta distribución (Figura 3.8) se llevó a cabo una regionalización de los patrones (uno, dos o tres) para la región dominada por los suelos Ferralíticos, la de mayor importancia agrícola del país, usando el método del “Vecino más Cercano”. En la Figura 3.9 se muestran los mapas regionalizados para ambas profundidades de estudio; en la Figura 3.9a se incluyen además los puntos que participaron en la regionalización.

Este resultado es de elevada importancia desde el punto de vista del manejo hidrológico de los suelos. En la franja de suelos ubicada aproximadamente entre las coordenadas 330 o 340 y los 360 km en la dirección este, dependiendo de la profundidad, hay un amplio predominio de Ferralíticos agrupados en el conglomerado C.1. Como se describió, responde a curvas con una pérdida gradual de humedad a medida que decrece el potencial. También en la porción de la llanura comprendida entre el este de Güines y San Nicolás de Bari, y más al norte, en la delimitada por los municipios de Madruga y Jaruco, son predominantes los suelos que presentan esta característica de retención de humedad.

En tanto, en muchas áreas de transición entre la llanura y las zonas de elevaciones, así como en la parte más al sureste de la actual Mayabeque, perteneciente a Nueva Paz, predomina el patrón C.2. Llama la atención esto último por ser un área muy llana, predominantemente bajo Ferralíticos, aun cuando el patrón es consistente en ambas profundidades. Se debe quizás a que las muestras correspondientes han sido tomadas en una zona de amplia variabilidad de suelos, con la presencia de una pequeña cuña de Fersialíticos por el norte e Hidromórficos por el sur (Ver Figura 2.3). La no medición en este estudio de puntos más al sureste no permite contrastar esta información. También se puede inferir el subtipo de suelo predominante en parte de la llanura, algo sobre lo cual se profundizará posteriormente.

Es también llamativa la franja de curvas tipo C.2 que, solo a la profundidad 10-15 cm, se interpone entre el C.1 y C.3 en la región centro-oeste, en torno a los 330 km en la

dirección este, y los 330 y 345 km en la dirección norte. Coincide con la zona de mayor gradiente de alturas de la llanura sur (ver DEM de la Figura 2.2), y se extiende hasta una región ondulada perteneciente a Guanajay. Ello parece estar asociada a un efecto erosivo a largo plazo, que propició la deposición de suelos en la superficie. Algo similar ocurre en la franja de llanura al este del municipio San José, que parece dividir en dos la cordillera Bejucal Madruga Coliseo.

También en una porción que delimita la parte más suroeste del muestro, aparece representado este tipo de agrupamiento, sobre todo a la segunda profundidad. López (2001), en uno de los pocos elementos que se tienen para contrastar, reporta para un Ferralítico Rojo Compactado y un Gley Amarillento enmarcado en la parte sur de Alquizar una curva del tipo C.2.

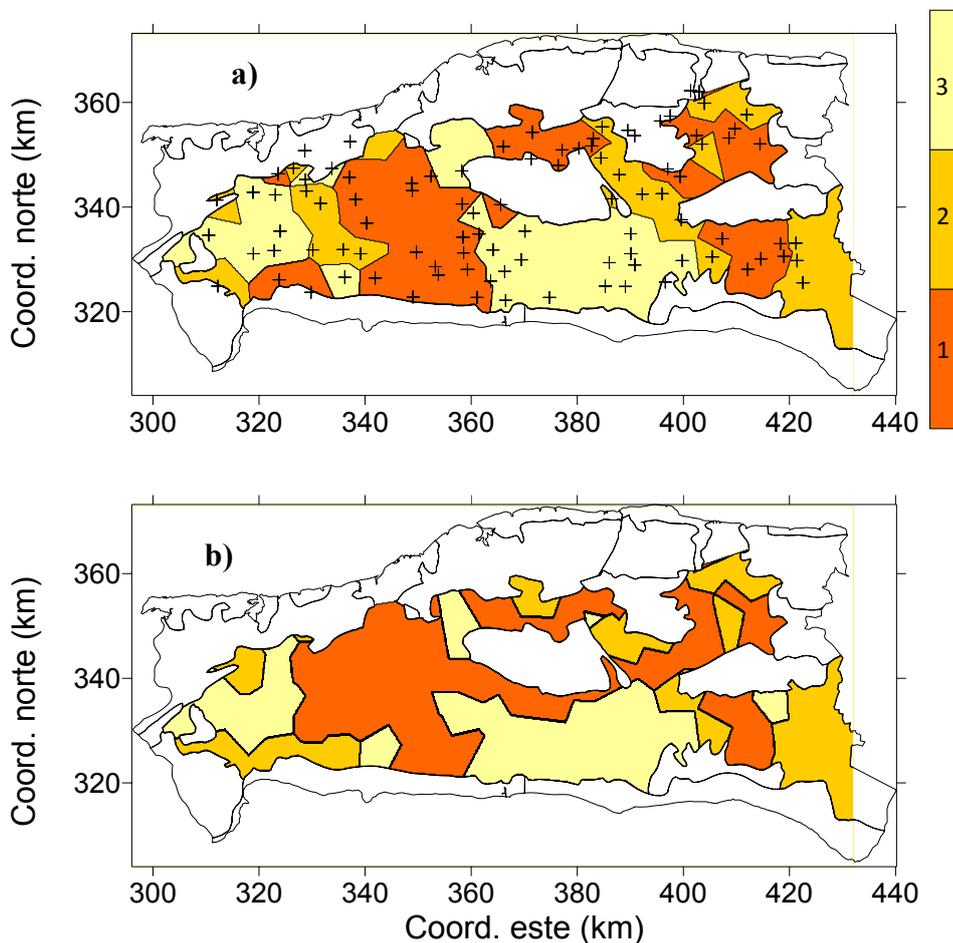


Figura 3.9. Regionalización de las CRHS correspondientes a los suelos Ferralíticos a partir del análisis de conglomerados jerárquicos y el método del “vecino más cercano” para a) la profundidad 10-15cm y b) 35-40cm.

En la porción centro sur de la región hay un claro predominio de suelos agrupados en el agrupamiento C.3, caracterizado por la curvas en forma de “S”. Se ubican en áreas pertenecientes a los municipios de Bejucal, Batabanó, Melena del Sur y Güines. También

aparece representado en el mapa en zonas del extremo más al suroeste de la provincia, principalmente en el municipio de Artemisa.

Un aspecto de interés es hasta qué punto el patrón observado de agrupamientos de curvas se vincula no ya con los tipos, sino con los subtipos de suelos. La Figura 3.10 muestra un mapa en el que el subtipo de suelo se ha obtenido mediante la interpolación de las categorías asociadas a los puntos de medición. A pesar de las posibles inexactitudes, el mismo se adecua bien a los propósitos específicos, que toman en cuenta solo aquellas categorías más representadas y de mayor interés.

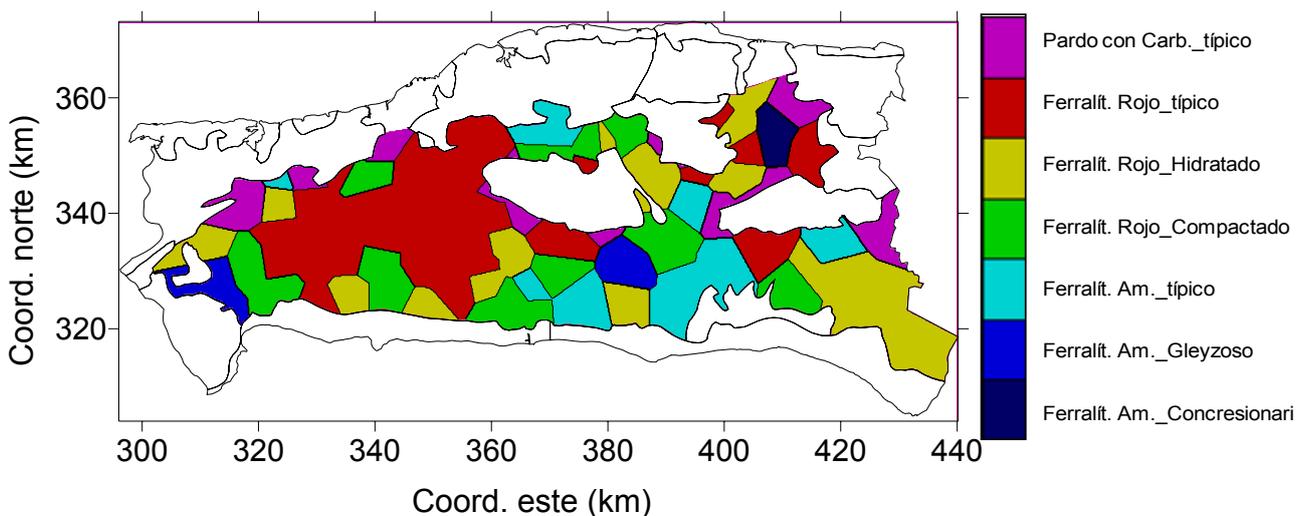


Figura 3.10. Regionalización de los subtipos de suelos para los tipos de suelos más representados en el estudio: Ferralíticos Rojos, Ferralíticos Amarillentos y Pardos con Carbonato.

Algunos elementos de la correspondencia entre este mapa y el de agrupamiento de las curvas, sobre todo a la segunda profundidad (Figura 3.9 b), son sumamente curiosos. En primer lugar cabe destacar la analogía entre el patrón espacial de suelos Ferralíticos Rojos Típicos (en rojo) y el agrupamiento C.1. Nótese que las analogías van mucho más allá de la relacionada con la porción suroeste de la región. Ese patrón, *grosso modo*, es similar al descrito por Bouza *et al.* (1985) para este subtipo.

En tanto el agrupamiento de curvas C.3, predominante en la porción centro sur, coincide con una zona de amplia variabilidad de suelos en medio de una supuesta homogeneidad del relieve. Esta porción es una de las de mayor pluviometría en todo el país y además entre la de mayores registros de intensas precipitaciones (Planos *et al.*, 2010), muy por encima de zonas aledañas. En cuanto al relieve prevalecen áreas de sumideros, embudos cársicos y depresiones cársico-erosiva que ejercen un fuerte control hidrodinámico sobre el efímero escurrimiento generado en superficies automórficas vecinas durante cada lluvia intensa (Vega, 2006, Febles *et al.*, 2009). Son indudablemente esas las causas que

originan el patrón de curvas observado. Por último, algunas franjas aledañas a zonas de montañas, donde predominan los suelos Pardos, y muchas de las áreas que clasifican como Ferralíticos Rojos Hidratados se corresponden con el C.2

Por lo tanto, a la pregunta sobre si en la antigua Habana hay una clara asociación entre tipos de suelos y tipos de curvas de retención, un aspecto debatido entre círculos de edafólogos, pedólogos y físicos de suelos, la respuesta es que aunque muy compleja, todo indica que sí. En particular para los Ferralíticos la diferenciación de las curvas se da al nivel de subtipos. Un primer grupo (asociado al C.1) ampliamente dominado por Ferralíticos Rojos típicos, un segundo (asociado al C.2), con un patrón menos característico de suelos Ferralíticos, complementado por suelos Ferralíticos Rojos Hidratados, y un tercero (el C.3) en zonas de elevada variabilidad de subtipos de suelos, que a su vez responden a los patrones de variabilidad del relieve y el clima.

Por último y, retomando la Figura 3.8, de los cinco agrupamientos principales para los no Ferralíticos, el C.1 y el C.4 no poseen un fuerte vínculo con los obtenidos para los Ferralíticos. Se asocian en lo fundamental a zonas de elevaciones, o muy próximas a ellas, dominadas por suelos Pardos. En particular el C.4 muestra un patrón muy distintivo y homogéneo de curvas, tomadas todas en las proximidades de la franja más al este del macizo montañoso Bejucal-Madruga-Coliseo, perteneciente a Madruga.

El C.1 no Ferralítico, poco numeroso, se asocia a puntos tomados en la franja más al oeste de este macizo, entre los municipios de San José de las Lajas y Bejucal, así como en las alturas que rodean la zona urbana del municipio de Jaruco. No obstante, la variabilidad en estas áreas de montaña es mayor, sin que parezca haber un único patrón definido.

Las pendientes de las curvas conglomeradas en el C.4 (19 en total) hablan por sí solas de la particularidad del proceso de retención de estos suelos dentro de la región. Este grupo se caracteriza por una humedad de saturación promedio elevada ($0.59 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), prácticamente hasta los -30 kPa, para después decrecer bruscamente ($0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) a los -300 kPa, potencial a partir del cual la humedad permanece casi constante.

3.2.2 Relación entre agrupamientos de CRHS y las propiedades medidas

En el acápite anterior se discretizan espacialmente los patrones de curvas de retención predominantes en la región de estudio. En cambio, cuáles son las razones que provocan el comportamiento observado. En particular, qué factores dan lugar al patrón de variabilidad observado en la llanura sur, homogénea en cuanto a tipo de suelo.

La Tabla 3.7 muestra el resultado de la prueba de comparaciones múltiples a partir de un ANOVA simple de aquellas propiedades de suelo que poseen diferencias significativas por agrupamiento. Se toman en consideración los tres agrupamientos principales asociados al área predominantemente bajo Ferralíticos. Las variables vinculadas con la distribución del tamaño de agregados no representadas en la tabla (por ejemplo porcentajes de agregados húmedos) por lo general también difieren significativamente, pero se excluyen con el ánimo de ganar en claridad. Su comportamiento se puede muchas veces inferir a partir del observado para los agregados secos. Lo mismo sucede con el comportamiento de la CCB, tampoco incluido, con respecto al del calcio.

El resultado de las comparaciones en cuanto al Ca, y por extensión a la CCB, es esperable. El C.2 posee valores medios significativamente superiores al de los otros agrupamientos. Del mismo patrón de las curvas observado, atribuible en el caso de C.2 a suelos con una presencia importante de arcillas tipo 2:1, se puede inferir esta respuesta. Como se ha venido enfatizando, son estas variables fundamentales de distinción entre tipos de suelos y, en consecuencia, tipos de curvas.

Tabla 3.7. Prueba de comparaciones múltiples entre variables del suelo cuyas medias difieren significativamente, tomando como factor los agrupamientos principales, C.1, C.2 y C3, de CRHS obtenidos para la zona predominantemente bajo Ferralíticos.

Variables	C.1	C.2	C.3
Ca	17.53 ^a	25.35 ^b	19.04 ^a
Da	1.27 ^a	1.31 ^{ab}	1.35 ^b
AS ₇₋₁₀	14.26 ^b	14.52 ^b	11.60 ^a
AS ₃₋₅	19.316 ^a	20.626 ^a	24.937 ^b
AS ₁₋₂	11.419 ^b	8.283 ^a	13.687 ^b
AS _{0.5-1}	7.463 ^b	4.112 ^a	6.283 ^b
AS _{0.25-0.5}	4.191 ^b	2.419 ^a	6.441 ^c

Nota: Letras diferentes indican diferencias significativas intergrupos para $p < 0.05$.

Pero lo más interesante es el peso que tiene la distribución de agregados en diferenciar el agrupamiento C.1 del C.3. La media de agregados entre 7 y 10 mm (AS₇₋₁₀) de C.3 es significativamente inferior a la de C.1. Por el contrario, el porcentaje de AS₃₋₅ de C.3 supera en casi 5 % al de C.1. Para el rango intermedio, entre 5 y 7 mm, no se aprecian diferencias de peso, por lo cual se excluyó como variable. Mientras, el rango de agregados secos entre 0.25 y 0.5 mm de C.3 es significativamente superior al de los otros dos agrupamientos. También la suma de agregados menores de 2 mm es considerablemente mayor en C.3 que en C.1, aunque significativa solo para $p < 0.1$. En ese rango ambos poseen valores significativamente superiores a los de C.2.

Estos y otros elementos indican que es la composición del tamaño de agregados la variable más fuertemente relacionada con el patrón fundamental de agrupamientos de

CRHS en la llanura sur de la antigua La Habana. Véase que también C.3 posee una Da significativamente superior a la de C.1, lo cual está influenciado por esa mayor presencia de agregados pequeños.

En la Figura 3.11 se aprecia el resultado de regionalizar los tres principales agrupamientos de los por cientos de agregados comprendidos entre 0.25 y 2 mm de diámetro en el área bajo Ferralíticos, empleando un procedimiento similar al de las CRHS. En ella se perciben algunas analogías importantes con el patrón espacial de agrupamientos descrito en la Figura 3.9. La sección en naranja se asocia con zonas donde predominan los porcentajes de agregados menores. Prevalece en la franja de la llanura sur entre los 330 y 350 km y al este de los 400 km, así como en buena parte de la zona norte acotada a ambos lados por áreas de elevaciones.

En tanto, la sección en amarillo refleja bien el predominio de mayores porcentajes de agregados secos al centro sur y al oeste de la región de interés. Es una prueba de la relevancia de la microestructura de los suelos Ferralíticos en el proceso de retención hídrica, abordada por disímiles autores (Ej.Obregon, *et al.*, 1985, Delgado, 1987), que a su vez está fuertemente influenciada por las particularidades del régimen hídrico y el relieve en la región.

La relación existente entre la composición de agregados y la configuración poral de un sistema polidisperso como el suelo es, no obstante, sumamente compleja, aun asumiendo que los agregados poseen forma esférica. Modelar las posibles formas de empaquetamiento de acuerdo a la distribución de tamaños de agregados es en la práctica inviable, teniendo en cuenta la infinidad de posibles formas de organización de los elementos.

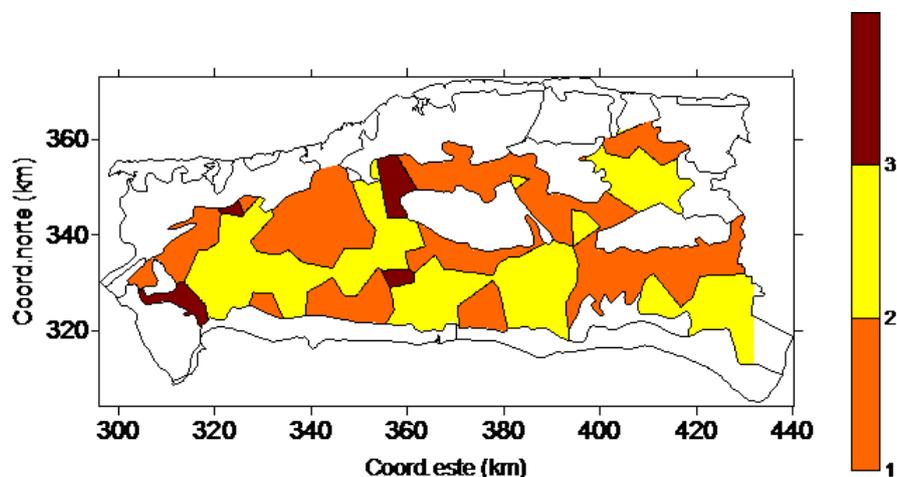


Figura 3.11. Mapa de regionalización geoestadística de los agrupamientos de agregados secos entre los 0.25 y 2 mm de diámetro empleando el método del vecino más cercano.

3.3 Desarrollo de funciones de pedotransferencia (PTFs)

3.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple

Uno de los propósitos del presente trabajo de tesis es el desarrollo de funciones de pedotransferencia que permitan estimar la CRHS en puntos no medidos. Un prerrequisito para la obtención de estas relaciones analíticas ha sido la identificación de las variables que poseen mayor valor predictivo, es decir, aquellas más significativamente correlacionadas, cumplimentado en el capítulo anterior.

No obstante, la decisión definitiva sobre qué variables incluir y cuáles no es intrínseca al propio proceso de desarrollo de las funciones. Ello se debe a que, además del valor predictivo, es necesario tener en cuenta el grado de colinealidad entre las variables. En la Tabla 3.8 se desea ilustrar la estadística de las variables que finalmente participan de las funciones de pedotransferencia en los subconjuntos de desarrollo (SD) y validación (SV) elegidos. Un ANOVA simple demuestra que no existen diferencias significativas entre las medias de ambos subconjuntos (nivel de significación 0.01).

Es de interés proponer no una, sino varias relaciones analíticas, de manera que el posible usuario pueda elegir de acuerdo a la información de que disponga. Una premisa para el desarrollo de las PTFs mediante el método de regresión lineal múltiple es que fueran relativamente simples, teniendo en cuenta solo los efectos principales de las variables. Si bien las interacciones entre ellas dan lugar a indicadores de ajuste estadísticamente superiores, se corre el riesgo equivalente a una sobre-parametrización de la ecuación.

La Tabla 3.9 resume el resultado de la calibración de los tres conjuntos de PTFs más representativos para la estimación de la humedad a cada uno de los potenciales matriciales empleando el SD. Se incluyen el coeficiente de determinación (R^2), el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM), así como el coeficiente de Akaike (AIC) para cada una de estas relaciones analíticas. El subíndice empleado (RL) identifica que el método empleado es el de regresión lineal.

El modelo 1 (**PTF_{RL1}**) emplea las variables tradicionales (textura, MO y Da) y el contenido de calcio. Estas variables en su conjunto resultan fácilmente medibles o disponibles dentro de algunas bases de datos existentes en nuestro país. El modelo 2 (**PTF_{RL2}**), de un grado mayor de complejidad, incorpora variables relacionadas con la composición de agregados del suelo, de amplio potencial predictivo. En tanto, el modelo 3 (**PTF_{RL3}**) emplea una variable concomitante, en este caso, el valor de la humedad a la saturación (θ_s).

Tabla 3.8. Estadística de las variables pertenecientes a los subconjuntos de desarrollo (SD) y evaluación (SE) empleados.

Variables	SD (N=200)				SV (N =29)			
	Mín.	Máx.	Media	Desv. típ.	Mín.	Máx.	Media	Desv. típ
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0.320	0.786	0.534	0.069	0.380	0.639	0.522	0.057
Arena (%)	0.69	43.53	15.541	10.499	3.33	40.97	13.18	10.226
Arcilla (%)	30.97	91.81	70.038	11.738	49.03	89.59	71.643	11.289
Ca (cmol kg ⁻¹)	3.000	62.500	22.510	13.654	5.000	46.000	21.234	10.695
MO (%)	0.160	5.090	2.131	1.125	0.250	3.470	1.564	0.903
AS ₁₋₂ (%)	0.131	27.316	11.021	6.861	0.978	24.005	9.552	6.108
AS _{0.5-1} (%)	0.036	22.212	5.526	5.489	0.164	28.740	6.721	7.569
AS _{0.25-05} (%)	0.042	33.020	3.864	3.973	0.230	30.330	5.134	6.499
AH _{0.5-1} (%)	0.814	32.222	8.527	6.064	1.606	17.898	8.824	4.833
AH _{0.25-0.5} (%)	0.387	38.964	7.104	5.351	1.405	19.119	7.526	4.863
Da (g cm ⁻³)	0.924	1.993	1.301	0.181	0.957	1.842	1.290	0.172

El **PTF_{RL1}** logra explicar entre un 60 y el 81 % de la varianza de la humedad en todo el rango de la curva. Tanto el EM como la RECM evidencian que las diferencias entre valores medidos y estimados son aceptables, incluso en el rango de los bajos potenciales, teniendo en cuenta que representan a lo sumo hasta un 1.3 y un 17% de las humedades medias, respectivamente. Un modelo aun más simple, que excluya el contenido de calcio, alcanza a explicar una varianza de la humedad que no sobrepasa el 66 % en el rango más húmedo y el 40 % en el más seco de la curva. Ello confirma lo demostrado por Medina *et al.* (2002) en relación a que solo en base a aquellas tres variables, textura, Mo y Da, se obtiene una pobre descripción del comportamiento de retención de estos suelos.

PTF_{RL2} conlleva a una mejoría sensible del R² y la RECM a costa de la inserción de variables de entrada vinculadas con la composición de tamaños de agregados. El R² varía entre el 67 y el 87 %, es decir, en torno a un 6% superior con relación a la **PTF_{RL1}**. En cambio el módulo del EM es como promedio superior.

Por último, la **PTF_{RL3}** incorpora la propia humedad de saturación como término independiente, razón de peso en la muy marcada mejoría del R² (entre 73 % y el 95%), sobre todo en el rango húmedo. Mejoran también sustancialmente el EM y la REMC, en particular para las humedades a potenciales mayores o iguales a -30 kPa, un resultado esperable.

Dos elementos comunes pueden ser atribuidos a estos tres modelos. En primer lugar el hecho de que las estimaciones de la humedades cercanas a la saturación (entre -1 y -30 kPa) son mucho más eficientes que aquellas en el rango seco. Ello era previsible a partir del número de variables significativamente correlacionadas y la magnitud de las correlaciones en uno y otro rango de potenciales (ver Tabla 3.5). Los factores que determinan la curva en el rango húmedo son predominantemente físicos, en tanto

aquellos en el rango seco son químico-físicos, y por ende más complejos. No obstante la tendencia es favorable, teniendo en cuenta que es precisamente el comportamiento en el rango húmedo el crucial para el manejo adecuado de los suelos. La correcta planificación del riego, por ejemplo, está sujeta principalmente a un adecuado dominio del comportamiento en dicho rango de potenciales.

Tabla 3.9. Resultados de la calibración de las PTFs desarrolladas usando el método de regresión lineal en términos del coeficiente R², el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM) y el índice de Akaike.

PTF _{RL1}	R ²	EM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)	AIC
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.7669 + 0.0028 \times Ca - 0.3424 \times Da$	0.81	-0.72	3.95	702.8
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.6843 + 0.0031 \times Ca - 0.2899 \times Da + 0.0049 \times \text{arcilla}$	0.81	-0.09	3.72	694.4
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.6359 + 0.0033 \times Ca - 0.2629 \times Da + 0.0047 \times \text{arcilla}$	0.8	0.36	3.9	702.6
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.5770 + 0.0035 \times Ca - 0.2393 \times Da + 0.0058 \times \text{arcilla} + 0.0030 \times MO$	0.70	-0.19	5.06	749.9
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.5246 + 0.0027 \times Ca - 0.2175 \times Da + 0.0066 \times \text{arcilla}$	0.68	-0.30	4.75	738.9
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.4701 + 0.0014 \times Ca - 0.1925 \times Da + 0.0087 \times MO - 0.0005 \times \text{arena}$	0.61	-0.02	4.71	737.4
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.4501 + 0.0011 \times Ca - 0.1836 \times Da + 0.0067 \times \text{arcilla} + 0.0079 \times MO$	0.60	-0.01	4.41	726.0
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} = 0.4438 + 0.0011 \times Ca - 0.1798 \times Da + 0.0069 \times \text{arcilla} + 0.0074 \times MO$	0.60	0.00	4.31	722.0
PTF _{RL2}	R ²	EM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)	AIC
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.8550 - 0.3443 \times Da - 0.0228 \times \log(AS_{0.25-0.5}) - 0.0291 \times \log(AHS_{0.5-1})$	0.85	-0.09	3.12	663.9
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.7608 + 0.0021 \times Ca - 0.2694 \times Da - 0.0399 \times \log(AHS_{0.5-1}) - 0.0230 \times AS_{1-2}$	0.86	0.02	2.87	651.4
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.7131 + 0.0022 \times Ca - 0.2386 \times Da - 0.0441 \times \log(AHS_{0.5-1}) - 0.0245 \times AS_{1-2}$	0.85	-0.15	4.02	709.9
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.6907 + 0.0021 \times Ca - 0.2244 \times Da - 0.0467 \times \log(AHS_{0.5-1}) - 0.0349 \times AS_{1-2}$	0.80	0.37	3.99	708.6
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.6441 + 0.0016 \times Ca - 0.2044 \times Da - 0.0472 \times \log(AHS_{0.5-1}) - 0.0022 \times AS_{1-2}$	0.72	0.37	4.96	746.4
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.5997 - 0.2362 \times Da - 0.0405 \times \log(AHS_{0.5-1}) - 0.0037 \times AS_{1-2} - 0.0501 \times \log(AS_{0.25-0.5}) + 0.0009 \times \text{arcilla}$	0.67	-0.75	3.91	707.1
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.5434 - 0.2312 \times Da - 0.0036 \times AS_{1-2} + 0.0010 \times \text{arcilla} - 0.0437 \times \log(AS_{0.25-0.5})$	0.67	-0.70	3.78	699.2
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} = 0.4571 - 0.2001 \times Da - 0.0029 \times AS_{1-2} - 0.0511 \times \log(AS_{0.25-0.5}) + 0.0011 \times \text{arcilla} + 0.0057 \times MO$	0.66	-0.71	3.56	688.8
PTF _{RL3}	R ²	EM ×10 ⁻⁴ (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)	AIC
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.3792 + 0.0005 \times Ca - 0.2671 \times Da + 0.6973 \times \theta_s$	0.95	-0.22	1.99	585.7
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.3814 + 0.0006 \times Ca - 0.2320 \times Da + 0.646 \times \theta_s - 0.0010 \times AS_{0.5-2}$	0.94	-0.11	2.09	596.3
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.3512 + 0.0008 \times Ca - 0.2108 \times Da + 0.5775 \times \theta_s - 0.0010 \times AS_{0.5-2}$	0.92	-0.77	2.48	626.0
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.2895 + 0.0010 \times Ca - 0.1880 \times Da + 0.5762 \times \theta_s - 0.0010 \times AS_{0.5-2}$	0.87	-0.50	3.12	663.9
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.3077 - 0.1928 \times Da + 0.5315 \times \theta_s - 0.0011 \times AS_{0.5-2}$	0.79	-27.23	3.96	707.3
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.3127 + 0.0004 \times Ca - 0.1656 \times Da + 0.2773 \times \theta_s + 0.0058 \times \text{arcilla}$	0.72	-11.48	3.72	696.4
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.3129 + 0.0003 \times Ca - 0.1631 \times Da + 0.2397 \times \theta_s + 0.0067 \times \text{arcilla}$	0.73	-12.83	3.61	691.2
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} = 0.3076 + 0.0003 \times Ca - 0.1608 \times Da + 0.2375 \times \theta_s + 0.0068 \times \text{arcilla}$	0.73	-11.02	3.47	684.3

Un segundo elemento común es la tendencia hacia la subestimación, en la mayoría de los casos muy ligera, de los valores medidos, teniendo en cuenta el signo negativo de los valores del EM. En el sesgo parece influir la distribución comparativamente anómala de los errores en los puntos ubicados en la porción centro oeste la región, perteneciente a Madrugá. Para ese conjunto limitado de puntos se aprecian sistemáticas sobreestimaciones de la humedad a los bajos potenciales, llegando a ser hasta un 15 % del valor medido. La exclusión de estos puntos en el análisis conlleva a explicar una varianza adicional de la humedad entre los -300 y -1500 kPa de un 9 % como promedio.

Por lo tanto, la subestimación global (que toma en cuenta todos los puntos) puede ser el resultado de un efecto de compensación entre esos puntos y el resto.

Este comportamiento inesperado del valor de los errores en esa porción se asocia al parecer al tipo de suelos predominante en la zona. Varios elementos sugieren, en particular las propias curvas de retención de humedad, que son suelos expandibles. Nótese (vea la Figura 3.7) que esos suelos retienen un nivel casi constante de humedad hasta prácticamente los -30 kPa, inusual en el resto de la región, para después perder gran del agua en un rango estrecho de potenciales.

Otro elemento que apoya esa hipótesis es que son suelos con una elevada CCB, por encima de 30 cmol Kg^{-1} , llegando incluso a más de 60 cmol Kg^{-1} en algunos casos. Siendo expandibles, estos suelos poseen en el rango seco una densidad aparente superior a la considerada (medida a -10 kPa), y por lo tanto la humedad real en ese rango es mayor que la reflejada por la CRHS. Resultaría de interés evaluar también la curva de expansión contracción de estos suelos, peor ello está más allá de las posibilidades de este trabajo.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la información brindada por el coeficiente de información de Akaike (AIC). Este coeficiente sopesa el error de estimación del modelo y el número de variables independientes incorporadas en él. Un mayor valor del AIC indica un modelo menos apropiado, de ahí que las diferencias relativas de este parámetro estadístico permitan valorar en la práctica qué PTF elegir. Los valores medios del AIC de las **PTF_{RL1}**, **PTF_{RL2}** y **PTF_{RL3}** son 721.7, 696.9 y 656.4. Son diferencias no muy marcadas pero que reflejan que el paso del modelo **PTF_{RL2}** al **PTF_{RL3}**, que conllevó a la introducción de una variable concomitante, es ligeramente más efectivo que pasar de la **PTF_{RL1}** a la **PTF_{RL2}**, en el que se sustituyen variables tradicionales por otras vinculadas a la composición del tamaño de agregados. La decisión del posible usuario depende lógicamente de la disponibilidad de información o de equipamiento para la determinación de las variables involucradas.

¿Qué factores no tenidos en cuenta intervienen en la varianza no explicada, que como se decía es apreciablemente superior a los potenciales muy negativos? Desde nuestro punto de vista son básicamente tres. En primer lugar el no tener en cuenta directamente la cantidad de óxidos de hierro presentes, una variable cuya determinación experimental es compleja y muy raramente incorporada en aplicaciones prácticas vinculadas al manejo corriente de los suelos, pero de un peso importante en la agregación de los suelos Ferralíticos. Precisamente uno de los objetivos de haber incorporado la distribución del

tamaño de agregados en las estimaciones es el de indirectamente representar la acción de esos óxidos.

La segunda limitación es la de no disponer de las curvas de expansión contracción, como ya se había mencionado. Los suelos donde el tipo de arcilla predominante es 1:1 apenas se ven afectados por el fenómeno de la dilatación, en cambio aquellos del tipo 2:1, menos representados en la región, sí pudieran manifestar variaciones de volumen en dependencia del contenido de humedad. El hecho de que un suelo sea dilatante conlleva, bajo el procedimiento usual de determinación en el laboratorio de la CRHS, a que la densidad aparente en el rango más seco sea en tanto mayor que la asumida y, por ende, la humedad real es en alguna medida superior a la reportada.

Una forma muy efectiva en la práctica de evitar estas dificultades es la de incluir una variable concomitante, similar a como se hace en la PTF_{RL3} , pero asociada directamente con el rango seco de potenciales. Para que se tenga una idea, Tomasella y Hodnett (2005) usaron un término equivalente a la humedad a los -33 kPa. Una estrategia de ese tipo, evaluada en el estudio, conduce a que el R^2 para las humedades a los potenciales entre los -33 y -1500 kPa ascienda sustancialmente, entre un mínimo de 0.88 y un máximo de 0.95.

Un tercer factor a tener en cuenta es de los propios errores experimentales, indisolublemente ligados a cualquier investigación. Por ejemplo, un error no estudiado con profundidad en Cuba es en qué medida se altera la D_a y la CRHS por la toma de muestras en campo con el procedimiento habitual de muestreo.

A pesar de estas limitaciones el poder predictivo de las funciones es muy satisfactorio. La Tabla 3.10 ilustra el desenvolvimiento de estos modelos en predecir las humedades en los puntos del SV. El coeficiente de determinación apenas cambia, mientras la RECM es alrededor de un 20 % superior. El indicador más afectado es el EM, en torno a una o dos cifras significativas, pero al igual que el R^2 y la RECM, varía en un rango adecuado de valores en comparación con muchas de las aproximaciones de su tipo a nivel mundial (Ahuja *et al.*, 1985; Bruand *et al.*, 1996; Pachepsky *et al.*, 1996; van den Berg *et al.*, 1997; Minasny *et al.* 1999; Koekkoek y Booltink 1999; Tomasella *et al.*, 2003; Donatelli *et al.*, 2004; Ungaro *et al.*, 2005; Leenhardt *et al.*, 2006; Santra y Das 2008; Sarmadian *et al.*, 2009). Donatelli *et al.* (2004), en un estudio en el que comparan el funcionamiento de las PTFs de estimación de puntos más divulgadas a nivel internacional, concluyen que la RECM de las mismas varía entre un mínimo de 0.02 y 0.11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, que comprende bien el obtenido en el trabajo.

Tabla 3.10. Resultados de la validación de las PTFs desarrolladas método de regresión lineal en términos del coeficiente R^2 , el error medio (EM) y la raíz del error cuadrático (RECM).

		θ_v (a los potenciales abajo señalados)							
		-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
		------(kPa)-----							
PTF_{RL1}	R²	0.81	0.82	0.8	0.72	0.67	0.61	0.60	0.60
	EM ×10⁻² (cm³ cm⁻³)	-1.52	-0.85	-0.3	-0.76	-0.51	-0.09	-0.02	0.00
	RECM×10⁻² (cm³ cm⁻³)	4.23	4.14	4.31	5.21	6.17	5.80	5.48	5.33
PTF_{RL2}	R²	0.86	0.84	0.85	0.76	0.71	0.66	0.66	0.66
	EM ×10⁻² (cm³ cm⁻³)	-0.51	-0.58	-0.44	1.10	0.99	-0.36	-0.51	-0.26
	RECM×10⁻² (cm³ cm⁻³)	3.82	3.21	4.05	4.33	4.62	5.65	5.38	5.36
PTF_{RL3}	R²	0.96	0.91	0.9	0.84	0.78	0.71	0.73	0.74
	EM ×10⁻² (cm³ cm⁻³)	0.21	0.29	0.01	-0.58	-0.84	-0.73	-0.95	-1.01
	RECM×10⁻² (cm³ cm⁻³)	1.51	2.22	2.4	3.75	4.35	4.61	4.07	3.94

Un hecho interesante observado es que el EM de las humedades cercanas a la saturación usando las dos primeras funciones es sensiblemente superior al de las humedades a bajos potenciales. Esta tendencia contrasta con lo observado en la calibración (ver Tabla 3.9). El motivo es la relativa mayor representatividad de un agrupamiento de suelos, los Ferralíticos, en el subconjunto de validación que propicia un sesgo hacia la subestimación en el rango cercano a la saturación.

3.3.2 Análisis de redes Neuronales

La Tabla 3.11 muestra el resultado de la calibración de las nuevas PTFs empleando el método de redes neuronales. Estas funciones comparten las mismas variables de entrada que las representadas en la Tabla 3.8, pero ahora se distinguen por medio del subíndice RN (relativo a Redes Neuronales). En los tres casos se usa una función de activación lineal en ambas capas, en tanto el número de nodos o neuronas de la primera capa iguala al número de variables de entrada. Esta combinación fue apreciada como la óptima durante el ejercicio de calibración.

Lo más interesante es que con el empleo de esta sofisticada herramienta no se mejoran consistentemente las estimaciones de la humedad. Los modelos **PTF_{RN1}** y **PTF_{RN2}** muestran solo muy discretas mejorías con respecto a los análogos **PTF_{RL1}** y **PTF_{RL2}**, en la tabla 3.10, mientras el EM y la RECM de las estimaciones correspondientes al modelo **PTF_{RL3}** son incluso ligeramente inferiores como promedio a las del modelo análogo usando redes neuronales, aunque las diferencias no son significativas.

Tabla 3.11. Resultados de la calibración de las PTFS desarrolladas usando el método de redes neuronales en términos del coeficiente R^2 , el error medio (EM) y la raíz del error cuadrático (RECM).

		θ_v (a los potenciales abajo señalados)							
		-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
		-----kPa-----							
PTF _{RN1}	R^2	0.83	0.81	0.79	0.69	0.69	0.61	0.62	0.60
	EM $\times 10^{-2}$ (cm ³ cm ⁻³)	-0.12	-0.08	0.17	-0.13	-0.24	-0.01	-0.01	-0.01
	RECM $\times 10^{-2}$ (cm ³ cm ⁻³)	3.66	4.09	3.97	4.83	4.45	4.32	4.30	4.61
PTF _{RN2}	R^2	0.87	0.87	0.87	0.78	0.72	0.65	0.67	0.66
	EM $\times 10^{-2}$ (cm ³ cm ⁻³)	-0.12	0.02	-0.09	0.21	0.28	-0.42	-0.63	-0.49
	RECM $\times 10^{-2}$ (cm ³ cm ⁻³)	3.37	2.82	3.98	4.16	4.19	4.04	3.62	3.29
PTF _{RN3}	R^2	0.95	0.95	0.93	0.88	0.80	0.73	0.73	0.72
	EM $\times 10^{-3}$ (cm ³ cm ⁻³)	-0.02	-0.01	-0.08	-0.06	-2.49	-1.27	-1.14	-1.02
	RECM $\times 10^{-2}$ (cm ³ cm ⁻³)	2.10	2.11	2.61	3.13	4.08	3.79	3.70	3.55

Este resultado, aunque imprevisto, no es nuevo en este tipo de aplicaciones. Otros autores (Koekkoek y Bootink, 1999; Ungaro *et al.*, 2005; Merdun *et al.*, 2006) han reportado similar comportamiento. La razón, como en este caso, ha sido atribuida a la dependencia de tipo fuertemente lineal existente entre las variables dependientes e independientes. Ello confirma la hipótesis de que la varianza no explicada se debe a factores exógenos, no a la estructura de los modelos empleados.

Tabla 3.12. Resultados de la validación empleando la PTF_{RN3} en términos del coeficiente R^2 , el error medio (EM) y la raíz del error cuadrático (RECM) en el SV.

		θ_v (a los potenciales abajo señalados)							
		-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
		-----kPa-----							
R^2		0.96	0.93	0.90	0.84	0.76	0.68	0.70	0.71
EM $\times 10^{-2}$ (g/g)		-0.14	-0.3	-0.57	-0.59	-0.57	-0.79	-0.78	-0.77
RECM $\times 10^{-2}$ (g/g)		1.81	2.59	3.32	4.16	3.77	4.48	4.46	4.38

También los resultados usando las redes neuronales en términos de validación son similares al encontrado para la regresión lineal. La Tabla 3.12 ilustra el comportamiento para la PTF_{RN3}. Nótese que igualmente en este caso hay un incremento relativamente superior del error medio para los potenciales altos, mientras el coeficiente de determinación y la RECM sufren pequeñas variaciones.

A diferencia del método de regresión lineal no es posible plasmar analíticamente la relación funcional de una red neuronal. Ello en la práctica conspira contra la aplicabilidad de este método, ya que el posible usuario debería en principio disponer del resultado computacional obtenido en este trabajo. Si se tiene en cuenta además que no se puede decir que un método sea superior a otro en las estimaciones de la humedad de la región,

la sugerencia es divulgar los resultados del método de regresión, equiparable en eficiencia, pero menos engorroso.

3.3.3 PTFs de suelos Ferralíticos

En el epígrafe anterior se han obtenido funciones de pedotransferencia para estimar las curvas CRHS, sin distinguir entre uno u otro tipo de suelos. Aun cuando el grado de exactitud y la confiabilidad alcanzada por estos modelos es adecuada, estos indicadores pueden ser aún mejorados limitando el espectro de suelos que participa del proceso de obtención de las PTFs. Particular interés posee el desarrollo de modelos relacionados únicamente con suelos Ferralíticos, atendiendo a su amplio predominio en la región, y en general el peso que poseen dentro del sector agroproductivo del país.

Da ahí que, parte del propósito vinculado a la obtención de PTFs esté dirigido al diseño de relaciones de este tipo enfocadas específicamente a los suelos Ferralíticos. Para ello se emplearon las PTFs derivadas a partir del método de regresión lineal múltiple. Los datos utilizados para su desarrollo y validación se conforman ahora por los puntos pertenecientes a este agrupamiento presentes en el SD (140) y el SV (21).

La Tabla 3.13 muestra el resultado de la calibración de una PTF, ahora distinguida con el subíndice “Ferr” (de Ferralíticos), estructuralmente similar a la **PTF_{RL3}**. La comparación del resultado de la calibración de la nueva PTF con esta última (vea la Tabla 3.10) muestra una discreta mejoría del EM y la RECM, mientras el R² es ligeramente inferior. El que no se aprecie un sustancial avance en las estimaciones se debe a la amplia representatividad de este agrupamiento de suelos en la base de datos más general y a la gran variabilidad de las curvas dentro del mismo.

Tabla 3.13. Resultados de la calibración de las PTFs desarrolladas para suelos Ferralíticos usando el método de regresión lineal en términos del coeficiente R², el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM)

PTF _{Ferr}	R ²	EM ×10 ⁻⁴ (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.3573 - 0.2381 \times Da + 0.6991 \times \theta_s$	0.94	0.11	1.32
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.3477 + 0.0013 \times Ca - 0.2062 \times Da + 0.5399 \times \theta_s$	0.93	-0.1	1.8
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.3451 + 0.0012 \times Ca - 0.1907 \times Da + 0.4720 \times \theta_s - 0.0006 \times AS_{0.5-2} + 0.0003 \times \text{arcilla}$	0.91	-0.39	1.96
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.2798 + 0.0010 \times Ca - 0.1703 \times Da + 0.4623 \times \theta_s - 0.0005 \times AS_{0.5-2} + 0.0006 \times \text{arcilla}$	0.85	-0.21	3.55
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.2357 + 0.0009 \times Ca - 0.1609 \times Da + 0.4454 \times \theta_s - 0.0007 \times AS_{0.5-2}$	0.73	-20.55	3.97
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.2422 - 0.1584 \times Da + 0.4567 \times \theta_s - 0.0005 \times AS_{0.5-2} + 0.0006 \times \text{arcilla}$	0.71	-10.38	3.67
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.2031 - 0.1288 \times Da + 0.4475 \times \theta_s + 0.0004 \times \text{arcilla} - 0.005 \times \text{arena}$	0.72	-10.36	3.05
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} = 0.1992 - 0.1228 \times Da + 0.4415 \times \theta_s + 0.0003 \times \text{arcilla} - 0.005 \times \text{arena}$	0.73	-10.37	2.91

No es común, por ejemplo, que un único agrupamiento de suelos en una región bien delimitada pueda manifestar variaciones tan severas del patrón de las CRHS en el caso Ferralítico. Es normal que haya gran variabilidad, pero es poco frecuente que se produzcan variaciones tan acentuadas del patrón de pendientes de las curvas, como el que se ilustra en la Figura 3.6.

El conjunto de estimadores para la obtención de PTF_{Ferr} básicamente no difiere en relación a modelos anteriores. No obstante, a los más bajos potenciales cobran relevancia el papel de la arena y la arcilla en detrimento del contenido de calcio. El rol de estas fracciones texturales y de la Da a estos potenciales, así como la relativa independencia con la materia orgánica destacan la similitud de esta PTF con otras de su tipo empleadas en suelos del trópico (Aina y Periaswamy, 1987; Dijkerman, 1988; Oliveira, 2002; Tomasella y Hodnett, 2003).

Por último la Tabla 3.14 ilustra el resultado de la validación de la PTF_{Ferr} . Las tendencias observadas con anterioridad en la comparación de la estadística de la calibración de esta PTF con la análoga general (PTF_{RL3}) son también válidas aquí. La RECM es como promedio un 10% inferior al reportado en la validación del PTF_{RL3} , en cambio el R^2 decrece muy ligeramente.

Nótese que aquí se hace referencia solo al error global de ambas funciones. Cuando el error de validación de esta última función, PTF_{Ferr} , se compara no con el total, sino solo con los errores de estimación de la función general (PTF_{RL3}) en los puntos clasificados como Ferralíticos se comprueba más claramente la utilidad de desarrollar una función distintiva del agrupamiento. En caso el EM y la RECM de PTF_{Ferr} son 22 y 13 % menores como promedio, respectivamente.

Tabla 3.14. Resultados de la validación de las PTFs desarrolladas para suelos Ferralíticos usando el método de regresión lineal en términos del coeficiente R^2 , el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM)

		θ_v (a los potenciales abajo señalados)							
		-1	-5	-10	-30	-100	-300	-1000	-1500
		----- (kPa) -----							
PTF_{Ferr}	R^2	0.97	0.91	0.9	0.85	0.75	0.7	0.72	0.72
	$EM \times 10^{-2} (cm^3 cm^{-3})$	0.07	0.11	-0.02	-0.48	-0.62	-0.51	-0.52	-0.51
	$RECM \times 10^{-2} (cm^3 cm^{-3})$	1.19	1.88	2.15	3.79	4.15	3.82	3.32	3.18

3.3.4 PTFs por agrupamientos de curvas

Las PTFs calibradas con anterioridad son aproximaciones cuyo alcance va en principio más allá de las fronteras en que han sido desarrolladas. Este autor considera por ejemplo,

que las PTFs específicas de los suelos Ferralíticos, en el epígrafe anterior puedan ser empleadas con eficiencia en otros de su tipo en el país, como los Ferralíticos de Ciego de Ávila. No obstante se considera válido un esfuerzo adicional, pero no extrapolable a otras regiones, dirigido a obtener PTFs por cada uno de los agrupamientos de CRHS. Este tipo de funciones toma ventaja de la discretización espacial de las curvas atendiendo a su forma, lo cual conlleva a una mejora sustancial de las estimaciones.

Precisamente dada la menor variabilidad intra-agrupamientos de las curvas es posible hallar nuevas PTFs mucho más simples, vistas algunas de ellas como un simple corrimiento en torno al valor de la humedad de saturación. Esto en principio equivale a considerar que las curvas dentro de un agrupamiento se pueden considerar como realizaciones estadísticas de una curva media. Aunque no en todos los casos es así.

La Tabla 3.15 y 3.16 muestra las nuevas PTFs desarrolladas por cada uno de los agrupamientos principales de CRHS. En la Tabla 3.15 se tienen en cuenta los tres agrupamientos (C.1, C.2 y C.3) atribuibles a los suelos Ferralíticos (ver Figura 3.8). En cambio, la 3.16 relaciona las PTFs para uno de los dos agrupamientos, el C.4 de la Figura 3.7, de los atribuibles a suelos puramente no Ferralíticos. Son los ubicados en la porción centro este de la región, perteneciente a Madruga. El otro agrupamiento de este tipo estaba escasamente representado por lo cual no se consideró estadísticamente fundamentado el asociarle nuevas PTFs.

Como ilustra la Tabla 3.15 los agrupamientos C.1 y C.2 son relativamente fáciles de estimar. Al no haber un punto de inflexión en la curva la función puede ser explicada únicamente en base a la humedad de saturación. Nótese que a pesar de la simplicidad de este tipo de modelos la bondad de ajuste es muy superior al de las PTFs precedentes. El R^2 ahora varía entre un mínimo de 0.79, para la humedad a -1500 kPa y un máximo de casi 1.0 para el rango cercano a la saturación. El EM y la RECM, por lo general en torno a un orden menor cuando se les compara con las PTFs anteriormente abordadas, también demuestran la elevada eficiencia

En cambio, la función para el agrupamiento C.3 demanda el uso de otras variables que sean capaces de modelar la más compleja variabilidad de sus curvas. En ellas el punto de inflexión actúa como un punto de “pivote” dadas las ligeras variaciones de la pendiente en torno a él. Es decir la forma de “S” propia del C.3 es en algunos casos más pronunciados que en otros y ello tiene consecuencias en el desarrollo de las PTFs. De ahí la inclusión de otras variables en el modelo.

Tabla 3.15. Resultados de la calibración de las PTFs desarrolladas para los agrupamientos de curvas de retención Ferralíticos (C.1,C.2 y C.3) usando el método de regresión lineal en términos del coeficiente R², el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM)

PTF _{C1}	R ²	EM ×10 ⁻³ (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻³ (cm ³ cm ⁻³)
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.1058+0.9580 \times \theta_s$	0.99	0.01	6.54
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.1055+0.8767 \times \theta_s$	0.96	-0.03	17.18
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.1094+0.8337 \times \theta_s$	0.93	0.05	21.76
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0,1151 +0.7640 \times \theta_s$	0.88	-0.03	27.45
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.1151 +0.6886 \times \theta_s$	0.84	-0.04	28.59
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.1224+0.6243 \times \theta_s$	0.83	-2.27	26.77
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.1334 +0.5548 \times \theta_s$	0.81	-2.37	25.44
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} =0.1368+0.5537 \times \theta_s$	0.80	-2.30	25.33
PTF _{C2}	R ²	EM ×10 ⁻³ (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻³ (cm ³ cm ⁻³)
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.089+0.9987 \times \theta_s$	0.99	0.01	6.54
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.1190+0.9678 \times \theta_s$	0.96	-0.03	17.18
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.1247 +0.9440 \times \theta_s$	0.93	0.05	21.76
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.1307+0.8974 \times \theta_s$	0.88	-0.03	27.45
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.1194 +0.8569 \times \theta_s$	0.88	-1.31	28.97
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.0950+0.8221 \times \theta_s$	0.85	-4.01	30.82
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.0768 +0.7724 \times \theta_s$	0.81	-4.18	32.92
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} =0.0722+0.7522 \times \theta_s$	0.79	-4.06	33.90
PTF _{C3}	R ²	EM ×10 ⁻⁴ (cm ³ cm ⁻³)	RECM ×10 ⁻² (cm ³ cm ⁻³)
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.1355+0.9955 \times \theta_s$	0.98	-2.08	2.78
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.0936+0.9571 \times \theta_s$	0.97	-4.05	8.80
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.1527+0.8812 \times \theta_s$	0.89	12.27	18.82
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.1633 +0.7200 \times \theta_s -0,0130 \times AS_{1-2} -0,0039 \times MO$	0.84	0.73	20.54
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.1619 + 0.6559 \times \theta_s -0,0141 \times AS_{1-2} -0,0088 \times MO$	0.83	-0.10	22.30
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.1371 + 0.6856 \times \theta_s -0,0122 \times AS_{1-2} -0,0095 \times MO$	0.83	-0.05	20.98
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.1185+ 0.6877 \times \theta_s -0,0106 \times AS_{1-2} -0,0090 \times MO$	0.84	0.71	18.90
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} =0.1141+ 0.6867 \times \theta_s -0,0101 \times AS_{1-2} -0,0086 \times MO$	0.84	0.66	18.44

Es muy interesante ver qué dos variables son las responsables de discernir entre ellas. Por un lado el porcentaje de agregados secos entre 1 y 2 mm. Recuérdese que las diferencias significativas entre el C.1 y el C.3 estaban asociadas a los AS₇₋₁₀, el AS₃₋₅, AS_{0,25-0,5} (ver Tabla 3.7). Para el AS₁₋₂ no había diferencias significativas. Ahora se observa que este rango intermedio, de diámetros entre 1 y 2 mm, está fuertemente relacionado con el paso entre un tipo de curvas con una forma de S (un cambio de concavidad) más pronunciado a otro tipo con curvas de pendiente más suave. Es una prueba inequívoca de la importancia crucial de la composición del tamaño de agregados en la CRHS.

La otra variable implicada en esa PTF es la MO. Como se señaló anteriormente el agrupamiento C.3 coincide con una zona de amplia variedad de subtipos de suelos Ferralíticos atribuida en su momento a la variabilidad del microrelieve y el clima. Se demostró antes que la MO, aunque sin ser una variable globalmente correlacionada sí tiene una apreciable correlación espacial con la humedad a escala local. Ello explica su inclusión en este sencillo modelo, en el que al igual que los anteriores se alcanzan muy buen ajuste.

Por último, se evidencia la posibilidad de modelar las curvas correspondientes también con un modelo basado solo en la humedad de saturación. Hay que señalar que la sustitución de esta variable por la densidad aparente, ajustando por supuesto los coeficientes, conlleva a una reducción del R^2 de alrededor del 6% y un incremento del EM y la RECM de un 13 y un 9 % respectivamente.

Tabla 3.16. Resultados de la calibración de las PTFs desarrolladas para los agrupamientos de curvas de retención no Ferralíticos (C.4) usando el método de regresión lineal en términos del coeficiente R^2 , el error medio (EM), la raíz del error cuadrático (RECM)

PTF _{C4}	R^2	EM $\times 10^{-4}$ (cm^3 cm^{-3})	RECM $\times 10^{-2}$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$\theta_{V-1 \text{ kPa}} = 0.1654 + 0.9580 \times \theta_s$	0.99	-8.03	15.40
$\theta_{V-5 \text{ kPa}} = 0.1971 + 0.8767 \times \theta_s$	0.99	-9.41	18.32
$\theta_{V-10 \text{ kPa}} = 0.1580 + 0.8337 \times \theta_s$	0.98	-9.99	24.34
$\theta_{V-30 \text{ kPa}} = 0.2289 + 0.7640 \times \theta_s$	0.90	-10.80	41.61
$\theta_{V-100 \text{ kPa}} = 0.1044 + 0.6886 \times \theta_s$	0.90	-0.55	30.93
$\theta_{V-300 \text{ kPa}} = 0.0372 + 0.6243 \times \theta_s$	0.86	13.49	28.94
$\theta_{V-1000 \text{ kPa}} = 0.0386 + 0.5548 \times \theta_s$	0.89	12.29	27.00
$\theta_{V-1500 \text{ kPa}} = 0.045 + 0.5537 \times \theta_s$	0.89	12.14	27.82

A manera de conclusión, este trabajo de tesis provee un conjunto de PTFs que brindan la posibilidad de estimar las CRHS en puntos no medidos tomando en cuenta un espectro amplio de situaciones. Con las PTFs no asociadas a los agrupamientos, las de carácter más general, se logra un R^2 entre 0.80 y el 0.96 y una RECM entre 0.012 y 0.042 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para los potenciales cercanos a la saturación, en tanto para los menores o iguales a -30 kPa varían entre un 0.6 y un 0.84, y entre 0.032 y 0.062 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Para las PTFs por agrupamientos, en cambio, se gana en cuanto a eficiencia de las estimaciones y se pierde en el alcance de las mismas desde el punto de vista de la posible extensión de las mismas. En todos los casos se demuestra la conveniencia de incorporar una variable concomitante para aminorar los errores de estimación.

3.4 Análisis de la incertidumbre asociada al modelo y a las variables de entrada

El presente epígrafe da respuesta a uno de los intereses fundamentales que se persiguen en esta tesis, el de analizar en qué medida el conocer la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos beneficia el proceso de estimación de la CRHS en una región específica. La cuantificación de la incertidumbre en las estimaciones agrohidrológicas regionales es un tema de vital importancia para valorar las reales potencialidades de una determinada herramienta; sobre este tema existe creciente interés en círculos científicos a nivel mundial (Kuczera y Parent, 1998; McLaughlin, 2002; Li *et al.*, 2003; Hengl *et al.*, 2004; Helton *et al.*, 2004; Chirico *et al.*, 2009). Lógicamente los resultados del presente análisis pueden ser aplicables solo a la provincia una vez que se basan en el comportamiento específico de las propiedades en la región.

El estudio persigue confrontar dos cuestiones esenciales. Primeramente, suponiendo que se quiere estimar la CRHS en un punto donde se dispone de valores medidos de las variables de entrada de las PTFs, qué valor agregado posee el patrón espacial de residuos de las PTFs halladas para la eficiencia del modelo empleado. En segundo lugar, si las estimaciones en cambio se llevan a cabo en puntos no medidos, qué consecuencias trae emplear valores interpolados de las propiedades de suelos y qué contribución tiene en este caso el patrón de errores a la incertidumbre total.

Para la consecución de los propósitos anteriores se llevan a cabo los análisis declarados en el acápite 2.2.3.4. Dada la dimensión del estudio y las visibles analogías en el comportamiento observado para dos grupos de potenciales, los más altos, entre -1 y -10 kPa, y los menores, entre -30 y -1500 kPa, serán solo ilustrados los resultados correspondientes a los potenciales de -10 y -300 kPa, sin que haya por ello una pérdida en la generalidad del resultado. Con ello se facilitan las comparaciones y se favorece la discusión.

En la Figura 3.12 se muestra el mapa de los residuos de la PTF general interpolados para ambos potenciales, a cada una de las profundidades. En un primer acercamiento sobresale el efecto que sobre los errores de estimación tienen la profundidad y el potencial. Esto último ha sido abordado con anterioridad, a pesar de lo cual es de interés llamar la atención en algunos aspectos. Nótese que mientras el error a los -10 kPa varía aproximadamente entre -0.07 y $0.08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, lo hace en un rango entre los -0.10 y $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a los -300 kPa. Ese relativamente amplio rango de errores a los más bajos potenciales está determinado en lo fundamental por los suelos analizados en Madruga, sobre todo su comportamiento a la primera profundidad.