

Figura 3.12. Mapas del residuo de la PTF_{RL3} a los -10 y -300 kPa interpolado por profundidades.

Con la profundidad no solo decrecen los errores medios puntuales y el promedio global, sino también los contrastes en el patrón; a los 35-40 cm son menos perceptibles las diferencias entre potenciales. Ello se atribuye a la mayor heterogeneidad de las propiedades y el mayor grado de alteración en el horizonte superficial del suelo.

En la Figura 3.13 se comparan el coeficiente de determinación (R^2), el error medio (EM), y la raíz del error cuadrático medio (RECM) bajo cuatro condiciones diversas:

- 1) PTF_{RL3}: correspondiente a la evaluación de esta PTF en los puntos del SV. Coincide con la estadística del análisis de validación empleando este modelo (Tabla).
- 2) PTF_{RL3}-residuo interpolado: al valor de la estimación en cada punto usando (1) se le resta el valor del residuo espacialmente interpolado.
- 3) PTF_{RL3}_INT: correspondiente a la evaluación de esta PTF en los puntos del SV, como en (1), pero ahora empleando valores interpolados de las variables de entrada.
- 4) PTF_{RL3}_INT -residuo interpolado: bajo el mismo principio que en (2), pero ahora a partir de los resultados de (3).

Nótese que la comparación de (1) con (2) y (3) con (4) da una medida de la incertidumbre asociada al error estructural del modelo, mientras la comparación de (1) con (3) y (2) con (4) da la medida de la incertidumbre asociada a las variables de entrada.

A los -10 kPa hay un descenso notable en la calidad del ajuste cuando, en lugar de usar valores medidos de las variables de entrada, se emplean valores interpolados (PTF_{INT}).

En este caso, el efecto de incorporar en las estimaciones el patrón espacial de las variables es leve. El coeficiente de determinación pasa de un valor mayor de 0.8 para las “PTF medida”, a 0.4 para la “estimada”, mientras los valores del EM y la RECM de estas últimas triplican al de las primeras. La inclusión del residuo interpolado disminuye sobre todo la RECM de las PTFs medidas y estimadas. Por los relativamente bajos errores a este potencial, su capacidad de modificar las estimaciones es limitada.

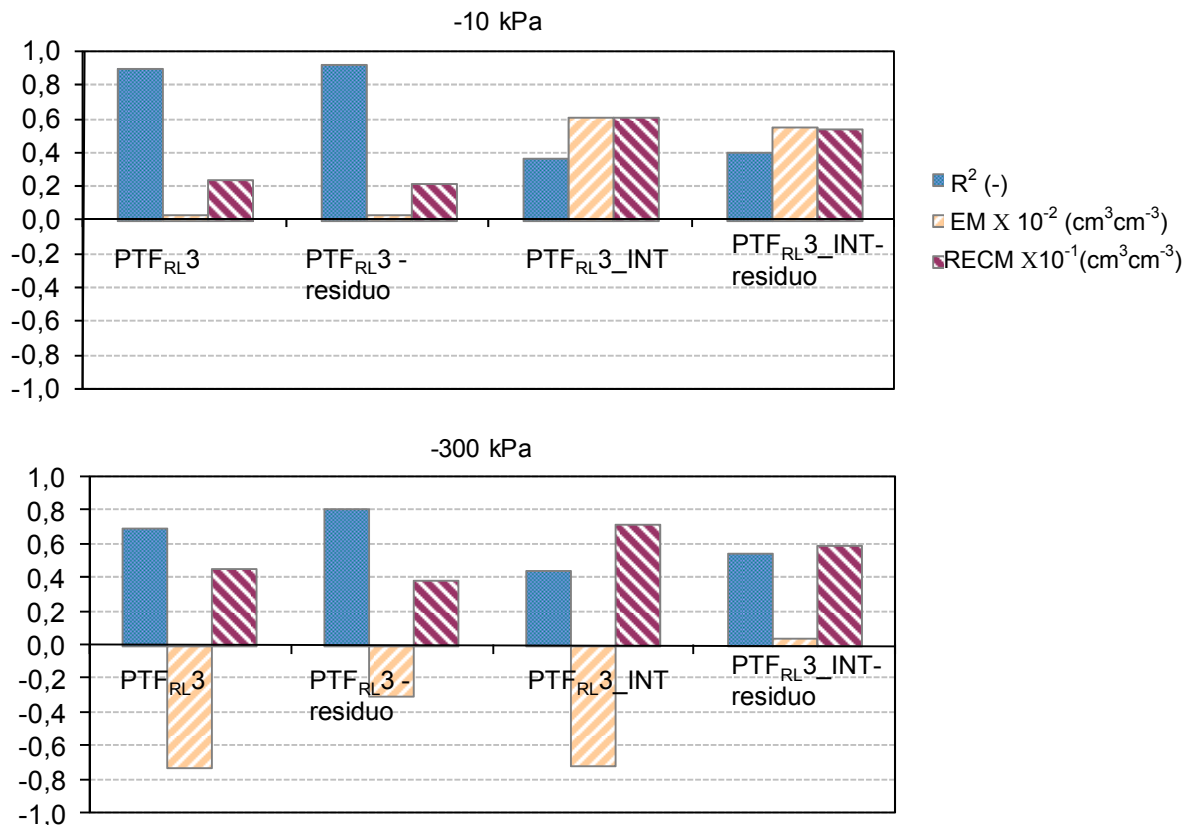


Figura 3.13. Estadística de la comparación del contenido de humedad medido y estimado mediante la evaluación de las funciones con variables medidas, interpoladas y con el residuo interpolado a los potenciales de la curva de -10 y -300 kPa.

Como es de esperar, el papel de los residuos es más relevante a los -300 kPa, donde el error medio global es superior. Mientras mayor es el error estructural de las PTFs, entendido como el error propio del modelo, más aporte tiene el conocer cómo se distribuyen estos errores espacialmente. En este caso se aprecia un incremento del R², significando para la “PTF medida” una varianza adicional explicada de la humedad a este potencial de hasta un 12 %, y una sensible disminución del EM y la RECM en ambos análisis. Una estadística muy similar se obtiene para los -1000 y -1500 kPa. En el caso de la PTF_{RL1} (Tabla 3.10) la incorporación del residuo conlleva a que el R² se incrementa hasta en un 16%.

No obstante, incluso valiéndose de la información espacial, es cuestionable hasta qué punto se pueden hacer uso de valores aproximados de las propiedades para estimar las

PTF en puntos no medidos, tanto a uno como a otro potencial. A pesar de la elevada densidad de puntos muestreados, los errores de interpolación de estas propiedades son tales que la eficiencia de las estimaciones en los puntos de evaluación se degrada marcadamente.

En sentido general, la incertidumbre asociada a las variables de entrada es significativamente mayor que la estructural del modelo. Con ello las PTF demuestran ser sensibles al grado de exactitud con que se estiman las variables más predictivas (Ca, Da y θ_s), sobre todo a los altos potenciales de la curva y en la primera de las profundidades analizadas. De ahí la importancia de elegir un método eficiente de interpolación a falta de medios para poder evaluar el valor real de las propiedades en puntos de interés. Un problema de la interpolación geostatística por Kriging es que suaviza la distribución de una población estadística (Chirico *et al.*, 2007). Una alternativa sugerida por estos autores es el empleo de la simulación estocástica (Goovaerts, 2000).

En resumen, los mapas del residuo interpolado de las funciones a cada uno de los potenciales matriciales constituyen una herramienta complementaria para el empleo de las funciones de pedotransferencia desarrolladas en las regiones de Artemisa y Mayabeque.

3.5 Importancia práctica de las CRHS y el balance hídrico de un suelo bajo el efecto de la variabilidad de las precipitaciones

El resultado de la modelación del efecto de la variabilidad en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en términos del balance hídrico es mostrado en la Figura 3.14. En el análisis se emplean las curvas de retención de humedad medidas en un punto perteneciente a la unidad de producción Ho Chi Minh, en Bainoa, Jaruco. En el eje "x" se representa el promedio de días entre eventos de precipitación, o lo que es lo mismo, el inverso de la frecuencia de precipitaciones, en tanto por el eje "y" se representa el valor promedio de la lámina de precipitación.

La Figura. 3.15a ilustra el número de riegos necesario para mantener la humedad del suelo de manera tal que el potencial por encima de los 35 cm sea superior a los -30 kPa, valor muy próximo al 85 % de la capacidad de campo obtenido a partir de la CRHS y que se ajusta muy bien al criterio observado en la práctica productiva. Como se puede apreciar, el rango de variación se mueve aproximadamente entre un mínimo de 19.4 riegos, para la menor frecuencia e intensidad, y un máximo de 22.6 riegos, para el rango opuesto. Ello representa un riego cada 4.6 y 4 días, respectivamente. La diferencia entre ambos extremos conlleva una diferencia máxima de 345 t/ha de agua, considerando

láminas de riego de 15 mm. En la unidad que se toma como referencia el cultivo de la papa se riega como norma cada cuatro días.

En tanto, la percolación promedio Figura 3.14b varía entre un mínimo de 10.54 cm y un máximo de 17.2 cm. Las mediciones del flujo subsuperficial son en extremo complejas, de ahí que es difícil obtener datos reales para confrontar estas cifras. No obstante, los valores se ajustan perfectamente al balance hídrico general.

La cantidad de riegos promedio depende tanto de la frecuencia como de la intensidad de las lluvias, de manera que, como es de suponer, a mayor frecuencia y pluviometría menor necesidad de riego. La percolación, por otro lado, es poco dependiente de la frecuencia. Sí es, en cambio, muy sensible a las variaciones de la intensidad, pero únicamente cuando estas superan aproximadamente los 9 mm. Es este un resultado lógico, pero aun muy interesante. Indica que en un rango bajo de intensidades las pérdidas por debajo de los 100 cm de profundidad son casi constantes, pero, dado un valor mínimo de intensidad por evento, estas pérdidas tienden a crecer linealmente. Nótese que ese mínimo tiende a ser ligeramente mayor cuando decae la frecuencia.

Como parte de este estudio se llevó a cabo un análisis de la sensibilidad de este valor mínimo a los parámetros que caracterizan la curva de retención humedad. Para ello se emplearon otros seis juegos de CRHS medidos en la región (dos por cada uno de los agrupamientos de curvas hallados para los Ferralíticos) manteniendo los demás factores invariables. Antes fue necesario ajustar los valores correspondientes de umbral para el comienzo del riego en cada caso teniendo en cuenta el valor del parámetro α de la curva, cuyo inverso se asocia frecuentemente con la capacidad de campo de un suelo.

Se pudo comprobar que esta lámina mínima de precipitaciones a partir de la cual crece linealmente el drenaje depende en lo fundamental de los valores de los parámetros θ_s , n , y la K_s en el modelo de van Genuchten (1980). En cambio es poco sensible a los valores de θ_r y α . Lógicamente el valor está también condicionado al régimen hídrico al que está expuesto el suelo, con un nivel de humedad que se mueve en un estrecho rango de potenciales cercanos a la saturación, así como por el hecho de asumir una conductividad hidráulica saturada constante, es decir, independientemente del tipo de suelos.

Otro elemento de interés es la sensibilidad en la respuesta a un cambio del umbral de potencial a partir del cual se inicia el riego. Como parte del estudio se evalúa qué efecto produce variar el umbral de potencial con respecto al criterio del 85 % de capacidad de campo, correspondiente en este caso a -30 kPa.

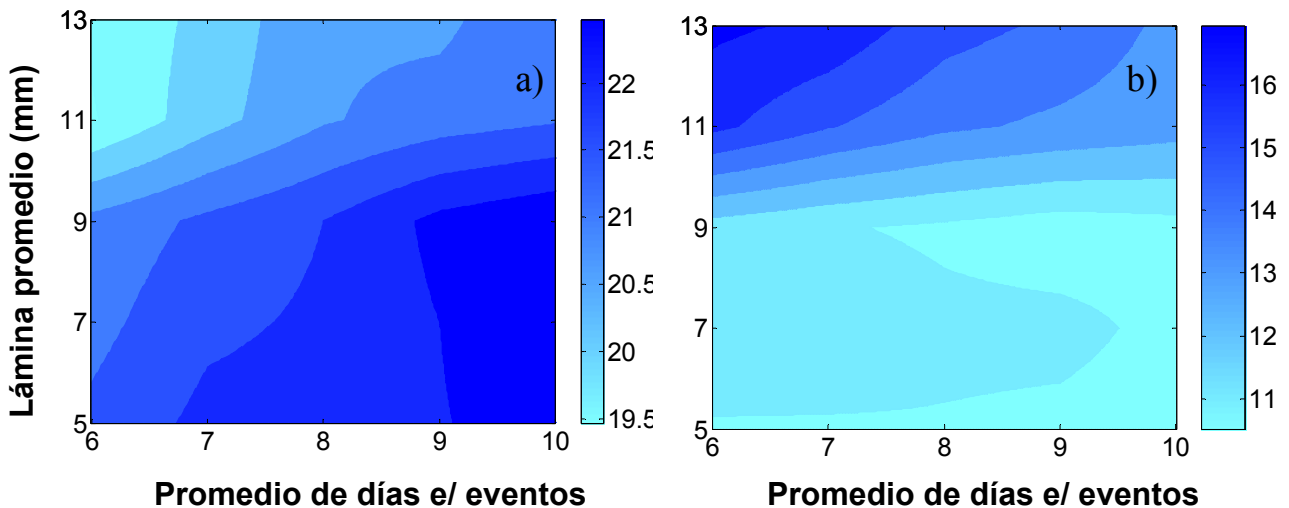


Figura 3.14. Mapas de contorno representando el valor promedio de a) número de riegos y b) agua que percola al final del perfil, en función de los días entre eventos de precipitación y la intensidad de las mismas.

Se obtiene que una variación del umbral de potenciales de ± 5 kPa, es decir, considerando -25 y -35 kPa como criterio de potencial para el riego, conlleva a diferencias de 1.1 riegos como promedio y 2.3 cm en pérdidas de agua por percolación para los tres meses. Esto representa 0.36 riegos y 0.76 cm de diferencia como promedio al mes, cifras que aunque parezcan pequeñas, resultan significativas a escala de toda una región.

En tanto, la desviación estándar de las series de valores de riegos (Figura 3.15) refleja que la variabilidad de la media es sensible a la frecuencia de las precipitaciones, pero se ve poco afectada por el volumen de precipitaciones, sobre todo en el rango de elevadas frecuencias. A medida que disminuye la frecuencia, o lo que es lo mismo, con el aumento de la cantidad de días entre eventos, se incrementa ligeramente la incertidumbre de estimación del modelo. En ese caso el número de riegos estimados depende más de la estructura particular que toma la distribución de las lluvias. La dispersión de los valores de percolación (Figura 3.15 b), al igual que el valor promedio de este término de balance, es en particular sensible a la lámina media de precipitaciones, aunque solo a partir de los nueve milímetros. Como es de suponer, en este cuenta más la estructura de la intensidad, sobre todo teniendo en cuenta que se está en presencia de un suelo con muy elevada conductividad hidráulica.

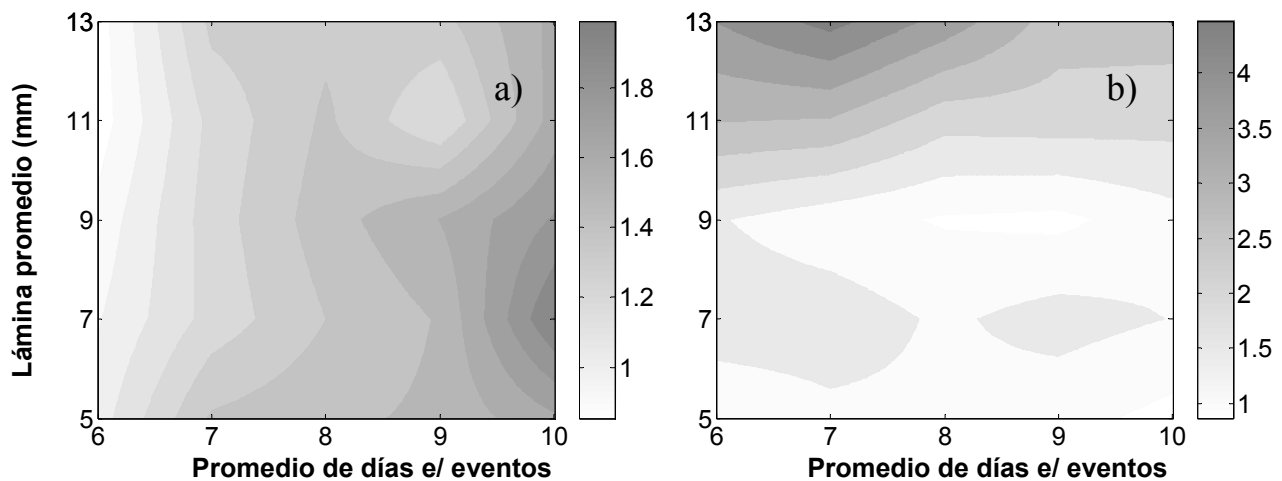


Figura 3.15. Mapas de contorno representando la desviación estándar del a) número de riegos y b) agua que percola al final del perfil, para las distintas series generadas, en función de los días entre eventos de precipitación y la intensidad de las mismas

Como se puede apreciar son diversas las aristas para el estudio de la optimización del manejo hídrico de la región tomando como problemática fundamental la variabilidad climática. Cuando se llevó a cabo el proyecto de investigación que dio lugar a este estudio siempre se pensó precisamente en las enormes potencialidades que brindaría el combinar el patrón de variabilidad climática de la región, sobre lo cual existe amplia referencia, con el obtenido para las curvas mediante el estudio para la toma de decisiones.

Fue interés del autor obtener al menos la serie histórica de precipitaciones y temperaturas para con ello desarrollar un análisis de este tipo más completo, pero no resultó posible. No obstante, queda en las manos de los investigadores este objetivo que puede arrojar mucha luz sobre la manera de manejar eficientemente estos suelos. Con seguridad son pocas las regiones a nivel mundial que pueden disponer de una información tan abundante a esa escala.

CONCLUSIONES

1. La densidad aparente, el contenido de calcio y los porcentajes de las fracciones más pequeñas de la composición del tamaño de agregados son las variables más fuertemente relacionadas con la variabilidad de la curva de retención de los suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque, a la escala de muestreo empleada. Los valores de textura y materia orgánica, tradicionalmente empleados para estimar esta propiedad, poseen un potencial predictivo considerablemente inferior.
2. Las funciones de pedotransferencia obtenidas considerando la totalidad de los suelos alcanzan un R^2 entre 0.80 y el 0.96 y una RECM entre 0.015 y 0.043 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 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 0.038 y 0.062 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente, con independencia del método empleado, ya sea redes neuronales o regresión lineal múltiple. Las PTFs análogas aplicada a suelos Ferralíticos conllevan a una reducción del REMC en torno al 13%, mientras la varianza explicada de la humedad prácticamente no varía.
3. En el estudio se identifican cinco tipos principales de agrupamientos de CRHS, tres de ellos vinculados a los suelos Ferralíticos. Uno mayormente asociado a los Ferralíticos Rojos Típicos, predominantes al este de la región de estudio, un segundo relacionado con aquellas zonas de más alta prevalencia de arcillas tipo 2:1, y un tercero que se vincula fundamentalmente a la porción central de la llanura Habana-Matanzas donde confluyen características particulares del relieve y el clima, que propicia una mayor variabilidad en cuanto a subtipos de suelos.
4. Existe una adecuada correspondencia entre la distribución de los principales tipos de suelos de acuerdo al mapa 1:25000 basado en la segunda clasificación genética de los suelos de Cuba y los agrupamientos de las CRHS. La variabilidad de estos agrupamientos dentro de un mismo tipo de suelos, en particular los Ferralíticos, está fuertemente vinculada a la del patrón de microagregados menores de 2 mm, variable no tenida en cuenta en la clasificación de suelos.
5. La vía más eficiente de estimación de las CRHS en puntos no medidos de la región mediante PTFs es empleando los modelos desarrollados por tipos de agrupamiento. Con ello mejoran sensiblemente el R^2 , entre un mínimo de 0.8 para -1500 kPa y un máximo de 0.99 para -1 kPa, y la RECM, que varía entre 0.0018 y 0.0305 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, para los mismos potenciales, usando a lo sumo tres variables para la estimación.
6. La incorporación del patrón espacial de los residuos a partir de las estimaciones con las PTFs en la predicción de la humedad en puntos no medidos de la región es más eficaz en la medida en que es mayor el error de estimación del modelo. Con ello se

logra explicar una varianza adicional de hasta un 16 % de la humedad a los potenciales entre los -300 y -1500 kPa.

7. 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 la importancia crucial de las curvas de retención de humedad en la optimización del manejo hidrológico de cara a los cambios climáticos que tienen lugar. Cambios de apenas 5 kPa en el umbral de potenciales para el criterio de inicio del riego con respecto al valor correspondiente al 75% de capacidad de campo, conlleva a diferencias de 0.37 riegos, y 0.77 cm de agua percolada como promedio al mes, empleando 15 mm como lámina de riego.

RECOMENDACIONES

1. Divulgar los resultados del trabajo de tesis entre especialistas y directivos vinculados al manejo de los suelos, el riego, y el medioambiente de las provincias de Artemisa y Mayabeque.
2. Evaluar la validez de las PTFs desarrolladas en otras regiones del país, en particular aquellas en las que la representatividad de los tipos de suelos sea similar a la de este estudio.
3. Caracterizar el comportamiento de la conductividad hidráulica saturada en la región de estudio teniendo en cuenta el patrón de variabilidad de las curvas de retención de humedad.
4. Extender la aplicación relacionada con el efecto de los cambios climáticos en la dinámica de la humedad de los suelos teniendo en cuenta el patrón multivariado de variabilidad de las precipitaciones y la evapotranspiración a escala de toda la región y los posibles escenarios de cambios.
5. Insertar los datos y metadatos relacionados con la información medida en la Infraestructura de datos Ministerio de la Agricultura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abid, M., Lal, R., 2008. Tillage and drainage impact on soil quality: I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil Till. Res.* 100, 89–98.
2. Abid, M., Lal, R., 2009. Tillage and drainage impact on soil quality II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil Tillage Res.*, doi:10.1016/j.still.2008.11.04.
3. Abbaspour, K.C., van Genuchten, M.Th., Schulin, R., Schlppi, E., 1997. A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. *Water Resour. Res.* 33 (8), 1879–1892.
4. Agyare, W., Park, A. S. J., Vlek P. L., 2007. Artificial Neural Network estimation of saturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone J.* 6: 423-431.
5. Ahuja, L.R., Naney, J.W., Williams, R.D., 1985. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1100– 1105.
6. Aina, P.O., Periaswamy, S.P., 1985. Estimating available water-holding capacity of Western Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. *Soil Sci.* 140, 55-58.
7. Akbarzadeh, A., Mehrjardi, T., Lake, R. y Ramezanpour, H., 2009. Application of artificial intelligence in modeling of soil properties (case study: Roodbar region, north of Iran). *Environmental Res. J.* 3 (2): 19-24.
8. Akaike, H., 1973. Information theory and an extension of maximum likelihood principle. In: Petrow, B.N., Csâki, F. (Eds.), *Second International Symposium on Information Theory*. pp. 267–281. Akadêmia Kiodô, Budapest.
9. Alfonso C. A., 1985: Características agrofísicas y micromorfológicas de los suelos de la llanura Ferralítica de Cuba. En *Suelo y Agua. Actas del Seminario de La Habana*. Editorial ORSTOM. París.
10. Amini, M., Abbaspour, K., Khademi, H., Fathianpour, N., Afyuni, M., 2005. Neural networks models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran. *European Journal of Soil Science*.
11. Arrouays, D., Jamagne, M., 1993. Sur la possibilité d'estimer les propriétés de rétention en eau de sols limoneux lessivés hydromorphes du Sud-ouest de la France a partir de leurs caractéristiques de constitution. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 79, 111-121.
12. Ascanio, O., 1973. Suelos Ferralíticos. En *Génesis y clasificación de los suelos de Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, pp.54-87.

13. Assouline, S., 2006. Modeling the relationship between Soil Bulk Density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal* 5:554-563.
14. Baker, L., Ellison, D., 2008. "Optimization of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method". *Geoderma* 144(1-2), 212-224.
15. Baldock, J.A., Aoyanna, M., Oades, J.M., Grant, C.D., 1994. Structural amelioration of a South Australian red-brown earth using calcium and organic amendments. *Aust. J. Soil Res.* 32, 571-594.
16. Bastet, G., Bruand, A., Voltz, M., Bornand, M., Que´tin, P., 1999. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils. In: van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Wu, L. (Eds.), *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. University of California, Riverside, USA, pp. 981-991.
17. Batjes, N.H., 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71, 31-51.
18. Baumgartl, T., Horn, R., 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil Tillage Res.* 19, 203-213.
19. Beckett, P.H.T., Webster, R., 1971. Soil variability: a review. *Soils and Fertilisers* 34, 1 - 15.
20. Bell, M.A., Keulen, H.V., 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 865-871.
21. Benites, M.V., Machado, P., Fidalgo, C., Coelho, M. y Madari, B. 2007. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma* 139, p 90-97.
22. Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2007. Impact of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1166-1173.
23. Bosch, D., 1981. Los suelos de planos Cársicos de la región occidental de Cuba. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, ORTOM, Paris, 159 pp.
24. Bosch, D.; J. Paneque; E. Fuentes; A. Salazar; O. Peña, 2001. Estudio de Factibilidad de la UBPC "9 de Abril" Cítricos Ceiba. Instituto de Suelos, MINAG. Informe Técnico (inédito). La Habana.
25. Bosch, D., Camacho, E., Ortega, F. 1984. Influencia de las rocas calizas en la génesis de los suelos Ferralíticos Rolos de las llanuras cársicas de Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 9.
26. Bouma, J., van Lanen, H.A.J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: *Quantified land evaluation procedures*,

- Proceedings of the international workshop on quantified land evaluation procedures, 27 April - 2 May. Washington, DC.
27. Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science* 9, 177-213.
28. Bouza, H., Delgado, R. Rivero. L., 1985. Régimen hídrico de los Suelos Ferralíticos Rojos y Vérticos de Cuba. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/colloques/24545.pdf.
29. Børgesen, C.D. y Schaap M.G., 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma* 127, 154– 167.
30. Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.
31. Brooks, R.H., Corey, A.T., 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irrig. Drain Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 92:61 88.
32. Bruand, A., Cousin, I., 1995. Variation of textural porosity of a loamy-clay soil during compaction. *European Journal of Soil Science*, 46, 377-385.
33. Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R., Jamagne, M., 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols, importance de la densité apparente. *Etude Gestion sols* 3, 27-40.
34. Bruand, A., Duval, O., Cousin, I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO. *Étude Gest. Sols* 11 (3), 323– 332.
35. Burrough, P.A. 1993. Soil variability: a late 20th century view. *Soils Fert.* 56: 529-562.
36. Cagliari, J., Veronez, M., ALVES, M., 2011. Remaining phosphorus estimated by pedotransfer function. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online], vol.35, n.1, pp. 203-212. ISSN 0100-0683. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100019>.
37. Camacho, E., 1980. Estudios de los suelos de la Llanura Cársica de la región occidental de Cuba. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, ORTOM, Paris, 143 p.
38. Camacho, E., Bosch, D. y Segalen, P., 1985. Étude de quelques sols de Cuba et en particulier des sols ferrallitiques 3. Les sols ferrallitiques rouges compacts (1). *Cah.O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XX.no.3, 177-187.
39. Campos, M., Guerra, M., Jaimez E., Olivera J., 2004. Caracterización geólogo - ambiental de las provincias habaneras [inédito], Informe Final, Proyecto Evaluación geólogo ambiental de las provincias habaneras Código 30302, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ciudad de La Habana.

40. Cancio, R., 2002. Informe sobre el cambio de pH en la Empresas de Cultivos Varios en provincia Habana. La Habana: Consejo Científico de Instituto de Suelos
41. Carminati, A., Kaestner, A., Lehmann, P., Flühler, H., 2008, Unsaturated water flow across soil aggregate contacts, *Advances in Water Resources*, 31 (9), 1221-1232.
42. Carter, E.A., Bentley, S.P., 1991. Using soil survey data for quantitative land evaluations. *Adv. Soil Sci.* 9: 117-213.
43. Carsel, R.F., Parrish, R.S., 1988. Development joint probability distributions of soil water characteristic. *Water Resour. Res.*, 24, 755-769.
44. Carrillo, R., 1980. Estudio comparativo de algunos métodos para determinar el momento de riego. IIRD. Informe Técnico IIRD.
45. Castro Filho, C., Lourenc_o, A., Guimaraes, M.F., Fonseca, I.C.B., 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil Till. Res.* 65, 45–51.
46. Centella A., Naranjo, L., Paz, L.R., 1997. Variaciones y cambios del clima de Cuba, Instituto de Meteorología, Centro Nacional del Clima, 59 pp.
47. Centella, A., 1998. Variabilidad y cambios del clima en Cuba. Reporte técnico del Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
48. Clark, P., Evans, F., 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35:445–453.
49. Cid, G., 1992. Efecto de la contracción-dilatación sobre las transferencias de agua y aire en suelos con arcillas dilatables del Valle del Cauto. Cuba. Tesis en Opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ciudad de la Habana, 116 pp.
50. Cinchota, R., vna Lier, Q.de J., 2004. Analise de variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28, 585-596.
51. Chang, R., Villegas, R., López, M., Cabrera, A., Rubio, R., Roldós, j., Marín, R., 1990. Variación de algunas características químicas de los suelos Pardos con Carbonatos de Cuba en dependencia de la roca subyacente. *Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo*, La Habana, pp104-107.
52. Chappell, N.A., Ternan, J.L., Bidin, K., 1999. Correlation of physical properties and sub-erosional landforms with aggregate stability variations in a tropical Ultisol disturbed by forestry operations. *Soil Tillage Res.* 50, 55–71.
53. Chirico, G.B., Medina, H., Romano, N., 2007. Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale.

54. Chirico, G.B. H. Medina, N. Romano, 2009. Functional evaluation of PTF prediction uncertainty: An application at hillslope scale. doi:10.1016/j.geoderma.06.008.
55. Cornelis, W., Khlosi, M., Hartmann, R., Van Meirvenne y De Vos, B., 2005. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. *Soil Sci. Am. J.* 69:1902-1911.
56. Coote, D.R., Malcolm-McGovern, C.A., Wall, G.J., Dickinson, W.T., Rudra, R.P., 1988. Seasonal erodibility indices based upon shear strength and aggregate stability in some Ontario soils. *Can. J. Soil Sci.* 68, p 405-424.
57. Cox, D.R., Miller, H.D., 1965. *The theory of stochastic process*. London, Methuen.
58. Curran, P.J., Atkinson, P.M., 1998. *Geostatistics and Remote Sensing*, *Progress in Physical Geography*, 22, 1, pp. 61-78.
59. Danalatos, N.G., Kosmas, C.S., Driessen, P.M., Yassoglou, N., 1994. Estimation of the draining soil moisture characteristics from standard data as recorded in soil surveys. *Geoderma* 64, 155– 165.
60. Delgado, R.M., 1987. *Estado energético del agua y su interrelación con las propiedades físicas e hidrofísicas de los suelos Ferralíticos Rojos de Cuba*. Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícola. La Habana, 131p.
61. Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
62. Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., E. Czyż, A., Jolivet C., Duval, O., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620–627.
63. Dick, W.A. y Gregorich, E.G., 2004. Developing and maintaining soil organic matter levels. In: *Managing Soil Quality Challenges in Modern Agriculture* (eds P. Schjonning, S. Elmholt & B.T. Christensen) pp. 103–120. CABI Publishing, Wallingford, Oxon.
64. Dijkerman, J., 1988. An Ustult-Aquult-Tropept catena in Sierra Leone, W. Africa, 11. Land qualities and land evaluation. *Geoderma* 42, 29-49.
65. Dobson, A. J., 2001. *An Introduction to Generalized Linear Models*, second edn, Chapman and Hall, London.
66. Dohrmann, R., 2006. Cation exchange capacity methodology I: An efficient model for the detection of incorrect cation exchange capacity and exchangeable cation results. *Applied Clay Science* 34, 31–37.
67. Donatelli, M., Wosten, J.H.M., Belocchi, G., 2004. Methods to evaluate Pedotransfer Functions. *Development in Soil Science* Vol. 30, ISSN 0166-2481/DOI:10.1016/SO166-2481 (04)30020-6.

68. Dueñas, G., Muñiz, O., Sánchez, T., Gómez, L., Alvarez, H., 2002. Reciclaje del nitrógeno en una sucesión de frijol-maíz-frijol en un suelo Ferralítico usando el método isotópico. *TERRA Latinoamericana*, vol.20, no. 001, pp 45-50. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
69. Elsenbeer, H., 2001. Preface of the Special Issue on Pedotransfer functions in hydrology. *J. Hydrol.* 251, 121-122.
70. Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., Castelli, F., 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric Processes. *Journal of Hydrology* 184 (1996) 3-17.
71. Escorihuela, M.J., Chanzy, A., Wigneron, J.P., Kerr, Y.H., 2010. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study. *Remote Sensing of Environment* (2010), doi:10.1016/j.rse.2009.12.011
72. Febles JM. 1988. La erosión de los suelos en las regiones cársticas de la provincia de La Habana. Ph.D. Thesis. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana 358 Fructuoso Rodríguez Pérez.
73. Febles, J. M., Vega, M. B. Tolón, A., Lastra, X., 2009. Assessment of soil erosion in karst regions of Havana, Cuba. *Land Degradation & Development*, p 1-17, <http://mc.manuscriptcentral.com/ldd>.
74. Funes, F., 2001. El movimiento cubano de agricultura orgánica. Transformando el campo cubano. *Avances de la agricultura sostenible. ACTAF*, La Habana, p. 15-38.
75. Games P.A., Howell, J.F., 1976. Pairwise Multiple comparisons procedures with unequal n's and/or variances. *Journal of Educational Statistics*, 1, 113-125.
76. García, J, Medina, H. y Núñez D., 2008. El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de La Habana. *Cultivos Tropicales*, vol. 29, no. 2, p.
77. García-Oremes, F., Guerrero, C, Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I. y Mataix-Beneyto, J. 2005. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Tillage Research* 82, p 65–76.
78. Gardner, W., Hillel. D, Benyamini, y., 1970. Post irrigation movement of soil water I. Redistribution. *Water Resour. Res.* 6(3851) 861.
79. Gee, G. W. y Or, D., 2002. Particle-size analysis. p. 255-293. En: J. H. Dane and G. C. Topp (ed). *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA*, Madison, WI.
80. Goovaerts P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J Hydrol* 228: 113–29.

81. Gordon, A. D., 1999. Classification. Second Edition. London: Chapman and Hall / CRC. p315, 316.
82. Gradusov, B.P., Peñalver, L., Cherniajovskii, A.G., 1976. Lateritas de Cuba (en ruso). En sedimentación y formación del relieve de Cuba en el Cuaternario, Edit. Ciencias, Moscú, pp. 107 -145.
83. Grant, C.D., Dexter, A.R., Oades, J.M., 1992. Residual effects of addition of calcium compounds on soil structure and strength. *Soil Till. Res.* 22, 283–297.
84. Hall, D.G., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., Wright, V.F., 1977. Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. Technical Monograph No. 9. Soil Survey of England and Wales, Harpenden.
85. Helton, J.C., J.D. Johnson, and W.L. Oberkampf, 2004. An exploration of alternative approaches to the representation of uncertainty in model predictions. *Reliab. Eng. Syst. Safe.* 85:39–71.
86. Hengl, T., Heuvelink, G. B.M., Stein, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, 75–93.
87. Herbst, M., Diekkrüger, B., Vereecken, H., 2006. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. *Geoderma* 132, 206-221.
88. Hernández, A., Pérez, J.M., Bosch, D., Rivero, L., 1999. Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. AGRINFOR, La Habana, 64p.
89. Hernández, A., Morell, F., Ascanio, M.O., Borges, Y., Morales, M. y Yong, A. 2006. Cambios globales en los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados (Nitisol ferrálicos, ródicos, éutricos) de la llanura roja de La Habana. *Cultivos Tropicales*, vol. 27, no. 2, p. 41-50.
90. Herrera, J., Cid, G., Llanos, M.A., 1985. Relaciones tensión-humedad para algunos suelos cubanos. En *Suelo y Agua. Actas del Seminario de La Habana*. Editorial ORSTOM. París.
91. Herrera, J., Cid, G., Ruiz, M. E., Wendland, W., 1989. Rangos de las propiedades hidrofísicas de los perfiles típicos de suelos según el mapa 1:25000. IIRD.
92. Heuscher, S.A., Brandt, C. C., Jardine, P.M., 2005. Using soil physical properties to estimate bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 51–56.
93. Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego, CA.
94. Hjorth, J.S.U. 1994. *Computer intensive statistical methods. Validation, model selection and bootstrap*. Chapman and Hall, London.

95. Hochberg, Y., 1974. Some generalizations of the T-method in simultaneous inference. *Journal of Multivariate Analysis*, 4, 224-234.
96. Hochberg, Y. Tamhane, A., 1987. *Multiple Comparison Procedures*. New York: John Wiley and Sons.
97. Hodnett, M.G., Tomasella, J., 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedotransfer function developed for tropical soils. *Geoderma* 108, 155–180.
98. Hopmans, J.W., Simunek, S., Romano, J., Durner, W., 2002. Inverse methods. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Physical Methods. Part 4*, SSSA, Madison, WI, in press. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>.
99. Hudson, B.D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49, p 189–194.
100. INRH, 2006. (On line) <http://www.Cubagua.cu/Cuba Sequia.htm>.
101. Instituto de Suelos. 1975. *II Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*. La Habana, Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba: 25.
102. Jaiméz, E.; M. Campos; A. García; M. Guerra; B. Gutiérrez; J. Olivera; E. Pacheco; Alcalde, J. y Fleita, R. 2004. Diagnóstico ambiental e interpretación paleo-ambiental de los suelos de las Provincias Habaneras, Cuba. En revista electrónica *Ciencias de la Tierra y El Espacio*. La Habana, Cuba. ISSN 1729-3790. En Internet: http://www.iga.cu/revista/cte_05/art_04-04/id14.htm.
103. Jhorar, R.K., Bastiaanssen, W.G.M., Feddes, R.A., van Dam, J.C., 2002. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. *J. Hydrol.* 258, 198-213.
104. John, C.M., Vantour, A., Rivero, F., Garea, E., Tamayo, A. Duthil, R., 2009. Uso de la Geomática como herramienta para el manejo ambiental de la Empresa de Cultivos Varios de Güira de Melena. "VI Congreso Internacional Geomática 2009".
105. Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, San Diego, CA, USA.
106. Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H., 1991. *Soil Physics*. 5th ed. Wiley, New York.
107. Kabat, P., Hutjes, R.W.A., Feddes, R.A., 1997. The scaling characteristics of soil parameters: from plot scale heterogeneity to subgrid parameterization. *J. Hydrol.* 190, 363-396.

108. Katul GG, Ellsworth DS, Lai C-T., 2004. Modeling assimilation and intercellular CO₂ from measured conductance: a synthesis of approaches. *Plant Cell Environ*; 23:1313–28.
109. Kay, B.D. 1997. Soil structure and organic carbon: A review. p. 169–197. In R. Lal et al. (Ed.). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL.
110. Klute, A., 1986. Laboratory Methods. in A. Klute (Ed): *Methods of Soil Analysis, Part I. Agronomy Monograph Series No 9 (2nd Edition)*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
111. Koekkoek, E.J.W., Bootink, H., 1999. Neural network models to predict soil water retention. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 489-495.
112. Kool JB, Parker JC, Van Genuchten MT., 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. A review. *J Hydrol* 91:255–93.
113. Kuczera G, Parent E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *J Hydrol* 211:69–85.
114. Lake, H.R., Akbarzadeh, A., Mehrjardi, R.T., 2009. Development of pedotransfer function (PTFs) to predict soil physico-chemical and hydrological characteristics in southern coastal zone of the Caspian Sea. *Journal of Ecology and the Natural Environment*. Vol. 1(7), PP 160-172.
115. Lal, R., 1979. Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management. In: Lal, R., Greenland D.J. (Eds.), *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*. John Wiley, Chichester, pp. 7-44.
116. Lal, R., Fausey, N.R., 1993. Drainage and tillage effects on a Crosby–Kokomo soil association in Ohio IV. Soil physical properties. *Soil Technol.* 6, 123–135.
117. Lal, R. y Shukla, M.K. 2004. *Principles of soil Physics*. Marcel Dekker Inc. New York.
118. Lapinel, B., 1988. La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las precipitaciones en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba.
119. Lapinel B., Fonseca, C., Cutié, V., Pérez, D., Aroche, R., Báez, R., Rivero, R., Rivero, I., Pérez, R., 2003. *La sequía en Cuba*. Monografía. Centro del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana Cuba. 243 pp.
120. Lapointe, F.J. y Legendre, P., 1995. Comparison tests for dendrograms: A comparative evaluation. *Journal of Classification*, 12: p 265–282.
121. Leij, F.J., Alves, W.J., Van Genuchten, M.Th., et al., 1996. *The UNSODA Unsaturated*.

122. Leij, F.J., Ghezzehei, T.A. y Or, D. 2002. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil and Tillage Research* 64, 61-78.
123. Leenhardt, D., Wallach, D., Le Moigne, P., Guerif, M., Bruand, A., Casterad, M.A., 2006. Using crop models for multiple fields. In: *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization and Application*. D. Wallach, D. Makowski and J.W. Jones (eds.), Elsevier, 209-248.
124. Lilly, A., Nemes, A., Rawls, W. Y Pachepsky, Ya.A. 2008. Probabilistic approach to the identification of input variables to estimate hydraulic conductivity. *SSSAJ: Vol.72, no.1*.
125. Li, S. McLaughlin, D., Liao, H., 2003. A computationally practical method for stochastic groundwater modeling. *Advances in Water Resources* 26, 1137–1148.
126. Lin, H.S., McInnes, K.J., Wilding, L.P., Hallmark, C.T., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties. II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 955-961.
127. Lipiec, J., Walczak, R., Witkowska-Walczak B., Nosalewicz, A., Słowińska-Jurkiewicz, A., Sławiński, C., 2007. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil & Tillage Research* 97, 239–246.
128. Loosvelt, L., Pauwels, V., R., Cornelis, W., De Lannoy, G., Verhoest, N., 2011. Impact of soil hydraulic parameter uncertainty on soil moisture modeling. *Water Resources Research*. Vol. 47, W03505, 16 PP., doi: 10.1029/2010WR009204.
129. López, T. 2001. Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los Balances Hídricos. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas, 182 p.
130. Luis, A.J. Y Martin, N.J. 2003. Manual de laboratorio. Métodos para el análisis físico de los suelos. Universidad Agraria de La Habana, 37 p.
131. Lynch, J., Bragg, E., 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Science* 2: 133- 171.
132. Manyame, C., Morgan, L., Heilman, J.L., Fatondji D., Gerard, B., Payne, W.A., 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma* 141: 407–415.
133. Mapa, R.B., Green, R.E., Santo, L., 1986. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 (5), 1133–1138.

134. Marín, R., Roldós, J., Rubio, R., Alonso, R., 1990. Características de los suelos Humitos Carbonáticos dedicados al cultivo de la caña de azúcar en Cuba. Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo, La Habana, pp 95-97.
135. Martin, M. P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K. M, Bourgeon, G., Arrouays, D., 2009. Optimizing Pedotransfer Functions for estimating soil bulk density using Boosted Regression Trees. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 485-493.
136. Matula, S., Mojrová, M., Spongrová, K., 2007. Estimation of the water retention curve (SWRC) using pedotransfer functions (PTFs). *Soil and Water Res.* (4):113-122.
137. Matheron, G., 1982. Pour une analyse Krigéante des données régionalisées in Report 732. Centre de Geostatistique, Fontainebleau.
138. Mayr, T., Jarvis, N.J., 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model. *Geoderma* 91, 1-9.
139. Mbagwu J.S, 2003. Aggregate Stability and Soil Degradation in the Tropics. Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, 3-2 .
140. Mcbratney, A.B., Odeh, I.O.A., 1997. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma* 77, 85-113.
141. McLaughlin, D., 2002. An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering. *Advances in Water Resources* 25, 1275–1286.
142. Medina, H., Tarawally, M., del Valle, A., Ruiz, M.E., 2002. Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. *Geoderma* 108-277-285.
143. Merdun, H., Çınar, Ö., Meral, R., Apan, M., 2006. "Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity". *Soil & Tillage Research* 90, 108-116.
144. Merdun, H., 2011. Alternative methods in the development of pedotransfer functions for soil hydraulic characteristics. *Eurasian Soil Science*, Vol. 43, N.1, 62-71, DOI: 10.1134/S1064229310010084.
145. Millán, H., González-Posada, M., 2005. Modelling soil water retention scaling. Comparison of a classical fractal model with a piecewise approach. *Geoderma* 125, pp 25–38.
146. Minasny, B., Mcbratney, A.B., Bristow, K.L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma* 93, 225-253.

147. Minasny, B., Mcbratney, A.B., 2000. Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. *Australian Journal of Soil Research* 38, 905-926.
148. Minasny, B., Mcbratney, A.B. 2002. The Neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 352– 361.
149. Minasny, B., Hopmans, J.W., Harter, T., Eching, S.O., Tuli, A., Denton, M.A., 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 417-429.
150. Minasny, B, Field, D., 2005. Estimating soil hydraulic properties and their uncertainty: the use of stochastic simulation in the inverse modelling of the evaporation method. *Geoderma* 126 , pp 277–290.
151. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3)513-522.
152. Mubarak, I., Angulo-Jaramillo, R., Mailhol, J. C., Ruelle, P., Khaledianb, M., Vauclin, M., 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent. *Agricultural Water Management* 97, 1517–1526.
153. Nemes, A., Schaap, M.G., Woosten, J.H.M. 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1093– 1102.
154. Nemes, A., Rawls, W, 2006. Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma* 132, p 47–58.
155. Nemesa, A., Walter J. R., 2006. Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma* 132 47-58.
156. Nielsen, D., Biggar, J., Ehr, K., 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia* 42 (7):215-259.
157. Nielsen, D., Wendroth, O., 2003. *Spatial and temporal Statistics. GeoEcology textbook*, Ed. Catena Verlag GMBH.
158. Obregon, A., Fundora, A., González, J.E., 1985. Composición mineralógica de los principales tipos suelos de Cuba. *Suelo y agua. Actas del seminario de La Habana 8-20 Abril*, Ed. L'ORSTOM, Paris.
159. Oliveira, L.B., Ribeiro, M.R., Jacomine, P.K.T., Rodrigues, J.J.V., Marques, F.A., 2002. Funções de pedotransferência para predição de umidade retida a potencias específicos em solos do estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 26, 315-323.
160. Or, D., 1996. Wetting induced soil structural changes: the theory of liquid phase sintering. *Water Resour. Res.* 32, 3041–3049.

- 161.Or, D., Leij, F., Snyder, V. y Ghezzehei, A. 2000. Stochastic model for posttillage soil pore space evolution. *Water Resource Research*, vol. 36, no. 7, p 1641-1652.
- 162.Or, D., Ghezzehei, T.A., 2002. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil Till. Res.* 64 (1–2), 41–59.
- 163.Orellana, R., Martínez, F., Ortega, F., 1986. Influencia de las fracciones apolares del humus sobre la estabilidad estructural en los suelos Oscuros Plástico y Ferralítico Rojo. *Ciencias de la Agricultura*, 31.
- 164.Orellana R., Ortega, F., Moreno, J., 2008. Fracción orgánica ligera del suelo como indicador agroecológico. *Agricultura Orgánica* no.2.
- 165.Ortega, F., 1983. Una hipótesis sobre el clima de Cuba durante la glaciación del Wisconsin. *Cien. Tierra y del espacio* 7: 57-68.
- 166.Ortega, F. 1984. Suelos automórficos sobre caliza dura. *Ciencias de la Agricultura* 21.
- 167.Ortega, F, 1985. Composición fraccional del humus de los principales suelos de Cuba. *Actas del seminario de La Habana 8-20 Abril 1985*.Ed. I O.R.S.T.O.M, Paris. p 301-323.
- 168.O'connell, D.A. y Ryan, P.J. 2002. Prediction of three key hydraulic properties in a solid survey of a small forest catchment. *Aust. J. Soil Res.*40:191-206.
- 169.Otero, L., Ortega, F. y Rivero, L. y Machin, P., 1986. Lavado de nutrientes en un suelo Ferralítico Rojo con caña de azúcar. *Ciencias de la Agricultura* 27.
- 170.Ozdemir, F., Güliser, C., Aşkin. T., 2000. Determination of relations between some soil properties and soil moisture constants using path analysis. *Congreso Internacional de desertificación Turquía*.
- 171.Pachepsky, Y. A., Timlin, D., Várallyay, G., 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science Society of America Journal* 60, 727-773.
- 172.Pachepsky, Y. A., Rawls, W.J., Gimenez, D. y Watt, J.P.C. 1998. Use the soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil Tillage Res.* 49: 117-126.
- 173.Pachepsky, Y. A., Rawls, W.J., 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1748– 1757.
- 174.Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Giménez, D., 2001. Comparison of soil water retention at field and laboratory scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 460– 462.
- 175.Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *Eur. J. Soil Sci.* 54, p 443– 451.

176. Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2004. Development of pedotransfer functions in Soil Hydrology. *Eur. J. Development in Soil Science*-Vol.30.
177. Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Linc, H.S., 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* 131, 308– 316.
178. Palladino, M., 2000. Proposal of a method for determining soil hydraulic characteristics at catchment scale. PhD Thesis. University of Basilicata, Potenza (Italy), (in Italian, with English abstract).
179. Paneque, J., E. Fuentes, A. Mesa, y A. Echemendía (1991): El Mapa Nacional de Suelos Escala 1:25 000. *Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo, La Habana, Memorias*, (D. R. Villegas y D. Ponce de León, eds.), pp. 1345-1347.
180. Paydar, Z., Cresswell, H.P., 1996. water retención in Australian soil, II. Prediction using particle size, bulk density and other properties. *Aust. J. Soil Res*, 34, 679-693.
181. Perfect, E., Kay, B.D., van Loon, W.K.P., Sheard, R.W., Pojasok, T., 1990. Rates of change in soil structural stability under forage and corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 179-186.
182. Pidgeon, J.D., 1972. The measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.* 23, 431-441.
183. Planos, E., Martínez, M.L., Vega, R., Boudet, D., Hernández, M., 2010. Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en Cuba: causas y características. Informe de proyecto 0801. INSMET. Programa Ramal “Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial”.
184. Ponce de León, D. 2003. Las Reservas de carbono orgánico de los suelos minerales de Cuba. Aporte metodológico al cálculo y generalización espacial. Tesis de Doctorado. Universidad Agraria de La Habana.
185. Porporato, A., Odorico, P. D., Laio, F., Ridolfi, L., Rodriguez-Iturbe, I., 2002. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources* 25, 1335–1348.
186. Pradeep, K.S., Bhushan, B., 2001. Physical characterization of a soil amended with organic residues in rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. *Soil Till. Res.* 60, 143–152.
187. Puckett, W.E., Dane, J.H., Hajek, B.F., 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 831– 836.
188. Quirk, J., Murray, R., 1991. Towards a model for soil structural behavior. *Aust. J. Soil Res.* 29: 829- 867.

- 189.Rachid, M., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S., Bessam, F., 2001. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil Till. Res.* 57, 225–235.
- 190.Rajkai, K., Kabos, S y van Genuchten, M.Th., 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil and Tillage Res.* 79, 145-152.
- 191.Rawls,W.J., Brakensiek, D.L. , Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Trans.ASAE* 108: 1316-1320.
- 192.Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seystoux, H.J. (Ed), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, NATO ASI Series C. Kluwer, Dordrecht.
- 193.Rawls, W.J., T.J. Gish, and D.L. Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16:213-234.
- 194.Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M., Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116, p 61-67.
- 195.Rawls, W.J., 2004. Pedotransfer function for United States. *Developments in Soil Science*, Vol. 30, ISSN 0166-2481/DOI10.1016/SO166-2481 (04)30023-1.
- 196.Reeve, M.J., Smith, P.D. and Thomasson, J., 2006.The effect of density on water retention properties of field soils.*European Journal of Soil Science* Vol.24 Issue 3, pages 355-367.
- 197.Reatto, A., Bruand, A.,Silva, E.M., Martins, E.S, y Brossard, M., 2001. Hydraulic porperties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma* 139, 51-59.
- 198.Reichardt, K., 1988. Capacidade de campo. *Rev. Bras. Ci. Solo* 12, 211-216.
- 199.Reynosa, G., Marín, R., 1990. Algunas características de los suelos Pardos con Carbonatos y Vertisuelos de la región oriental de Cuba. *Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo*, La Habana, pp 98-100.
- 200.Richards, L. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1, 318 - 333.
- 201.Richard, G., Cousin, I. Sillon, J, Bruand, A. y Guérif, J.2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on saturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, 49-58.

- 202.Rivero, L., Agafanov, L., 1978. Comparación de los métodos de dispersión de algunos suelos de Cuba en relación con su estructura y el contenido de óxidos de hierro y materia orgánica. *Cien. Agr.*2:107-120.
- 203.Rivero, L., 1985.Régimen hídrico de los suelos ferralíticos Rojos típicos de la región de Jovellanos, Cuba. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Instituto de Suelos (La Habana).
- 204.Rodriguez-Iturbe I, Porporato A., 2004. *Ecohydrology of water controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- 205.Romano, N., Palladino, M., 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. *J. Hydrol.* 265, 56–75.
- 206.Romano, N., 2004. Spatial structure of PTF estimate. *Developments in Soil Science*, vol.30, ISSN 0166–2481/DOI 10.1016/S0166-2481(04)30017-6.
- 207.Ruiz, M. A. Utset, A. Lau, Herrera, J. y Llanos, M., 1992. Tres modelos para la curva tensión-humedad en algunos tipos de suelos. *Revista cubana de Física.* 12(1).
- 208.Ruiz M., Utset, A., 1992. Curva tensión-humedad para algunos agrupamientos de suelos cubanos. *Cienc. Tec. Agrop.* 3(1):11-14.
- 209.Ruiz M. E., 1998. Empleo del Modelo SWACROP para el uso del agua en papa (v. desiere) y rendimiento del cultivo. Tesis en opción al grado de Dr C. Agric. Univ. Agraria de La Habana (UNAH), 120p.
- 210.Ruiz, M.E., Medina, H., 2003. Soil Hydraulic Properties of Cuban Soils. Lecture given at the College on Soil Physics, Trieste, 3-21 March.
- 211.Salchow, E., Lal, R., Fausey, N.R., Ward, A., 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. *Geoderma* 73, 165-181.
- 212.Santra, P., Das, B.S., 2008.Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. *Geoderma* 146:439–448.
- 213.Sarmadian, F., Taghizadeh Mehrjardi R. y Akbarzadeh, A., 2009. Modeling of Some Soil Properties Using Artificial Neural Network and Multivariate Regression in Gorgan Province, North of Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(1): 323-329, ISSN 1991-8178.
- 214.Schaap, M.G., Leij, F.J., 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* 163 (10), 765-779.
- 215.Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 847-855.
- 216.Shang, C., Tiessen, H., 2003. Soil organic carbon sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biogeochemistry* 62, 177–196.

217. Scheinost, A.C., Sinowski, W. y Auerswald, K. 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78, p129-143.
218. Shishov, E. V., Shishova, V. y Villegas, R., 1973: Fertilidad de Los suelos de algunas áreas cañeras de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 102pp.
219. Simunek J, van Genuchten M.T., 1996. Estimating soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resour Res*;32(9):2683–96.
220. Simunek, J., van Genuchten, M.T., Sejna, M., 2005. The HYDRUS 1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA.
221. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, D., Deneef, S.K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79, 7–31.
222. Smith, D.L.O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. *Journal of Soil Science* 36, 621–632.
223. Sobieraj, J.A., Elsenbeer, H., Vertéis, R.A., 2001. "Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulics conductivity: implications for modeling storm flow generation". *Journal of Hydrology* 251, 202-220.
224. Sousa, F. y Tendeiro, J.A., 2005. Validation Methodology in Hierarchical Clustering <http://conferences.telecom-bretagne.eu/asmda2005/IMG/pdf/proceedings/396.pdf>.
225. Stavi, I., Ungar, E. D., Lavee, H., Sarah, P. 2008. Grazing-induced spatial variability of soil bulk density and content of moisture, organic carbon and calcium carbonate in a semi-arid rangeland. *Catena* 75, p288–296.
226. Strudley, M.W., Green, R.T., Ascough II, J.C, 2008. Tillage effects on soil hydraulics properties in space and time: State of the science. *Soil Tillage Res.* 99, 4-48. Disponible en [www. Sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
227. Tamari, S., Wösten, J.H.M., Ruiz-Suárez, J.C., 1996. Testing an artificial neuralnetwork for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1732-1741.
228. Tessier D., Bigorre F, Bruand,A., 1999. La capacité d' échange:outil de prévision dès propriétés physiques des sols. *C.R. Acad.Agric. Fr.* 85, 37-46.
229. Tietje, O., Tapkenhinrichs, M., 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1088-1095.

230. Tietje, O., Hennings, V., 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69, 71-84.
231. Tisdall, J., Oades, J., 1982. Organic matter and waterstable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141- 163.
232. Tisdall, J.M., 1996. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 57–96.
233. Tomasella, J., Hodnett, M.G., Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 327-338.
234. Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestaza, S., Rawls, W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 67, 1085 - 1092.
235. Tomasella, J., Hodnett, M.G., 2005. Pedotransfer functions for tropical soils. *Developments in Soil Science*, Vol.30, DOI: 10, 1016/S0166-2450(04)300021-8.
236. Tukey, J., 1953. *The Problem of Multiple Comparisons*. Unpublished manuscript. Princeton University.
237. Ungaro, F., Calzolari, C y Busoni, E., 2005. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padana region of north Italy: water retention properties. *Geoderma* 124, p 293-317.
238. van den Berg, M., Klamt E., van Reeuwijk. L.P. y Sombroek, W.G., 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma* 78, p 161-180.
239. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44 (5): 892-898.
240. van Genuchten, M.Th., Nielsen, D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geo- a pore-scale network model. Water Resour. Res.* 32:2345–2358.
241. van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. The RETC Code water-retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:923–927, Version 1.0. EPA Report 600/2–91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
242. Vega, M. B. 2006. Evaluación de la erosión de los suelos en las regiones cársicas de La Habana mediante el nuevo método de EVERC. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas. La Habana, 177pp.

- 243.Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148:389-403.
- 244.Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H. , Vanderborght, J., Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, Vol. 44, W00D06, doi: 10.1029/2008WR006829.
- 245.Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M., van Genuchten, M.T., 2010. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A Review. *Vadose Zone Journal*; vol. 9; no. 4; p. 795-820; DOI: 10.2136/vzj2010.0045.
- 246.Vogel, T., van Genuchten, M. Th., Cislerova, M., 2001. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources* 24, pp 133-144.
- 247.Vogel, T., Roth, K., 2003.Moving through scales of flow and transport in soil. *Journal of Hydrology* 272 95–106.
- 248.Wall, A., Heiskanen, J., 2003. Water retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland. *For. Ecol. Manage.* 186 21.32.
- 249.Warrick, A.W., Nielsen, D.R., 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.), *Applications of Soil Physics*. Academic Press, New York, pp. 319–344.
- 250.Warrick, A.W., Myers. D.E. , Nielsen, D.R., 1986. Geoestatiscal methods applied to soil science.Int. A. Klute(ed). *Methods of soil analysis.Part 1*, 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison WI, pp.53-82.
- 251.Webster, R., Oliver, M.A., 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press, Oxford, 316 pp.
- 252.Wösten, J.H.M., Finke, P.A., Jansen, M.J.W., 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma* 66, 227-237.
- 253.Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.
- 254.Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2001. Padotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251, 123-150.

- 255.Zacharias, S., Wessolek, G., 2006. Excluding Organic Matter Content from Pedotransfer Predictors of Soil Water Retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:43-50. doi:10.2136/sssaj2006.0098,v
- 256.Zhang, H. 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil Tillage Res.* 31:263–275.

ANEXOS

Anexo 1.Semivariogramas

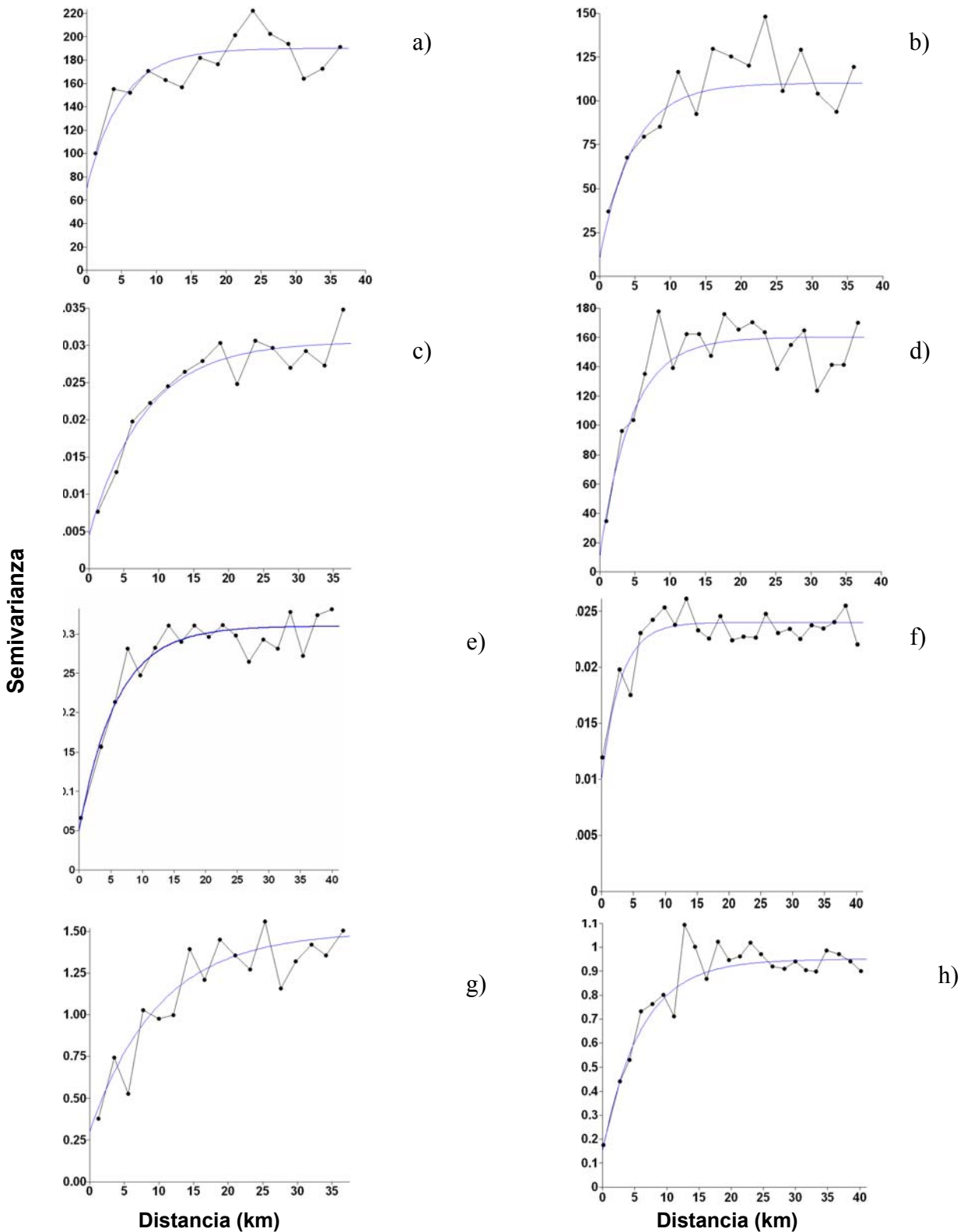


Figura 1. Semivariogramas de las propiedades a) contenido de arcilla (100 kg kg^{-1})²; b) contenido de arena (100 kg kg^{-1})²; c) densidad Aparente (g/cm^3)²; d) contenido de calcio (cmol kg^{-1})²; e) logaritmo del contenido de agregados secos entre 0.25-0.5 mm (100 kg kg^{-1})²; f) índice de estabilidad de agregados; g) materia Orgánica (100 kg kg^{-1})² y h) 1ra componente principal de la Humedad volumétrica. ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)².

Anexo 2. Glosario de términos y abreviaturas

CRHS: Curva de retención de humedad del suelo

h : Potencial matricial.

θ_r : Contenido de humedad residual.

θ_s : Contenido de humedad de saturación.

$\theta_{v,i}$: Contenido de humedad volumétrica para un potencial matricial – i .

CP₁: Primera componente principal del Contenido de humedad volumétrica a los potenciales matriciales ensayados.

CP₂: Segunda componente principal del Contenido de humedad volumétrica a los potenciales matriciales ensayados.

arena: Contenido de Arena.

limo: Contenido de Limo.

arcilla: Contenido de Arcilla.

d_r : Densidad real de suelo.

Na: Contenido de Sodio.

K: Contenido de Potasio.

Ca: Contenido de Calcio.

Mg: Contenido de Magnesio.

CCB: Capacidad de cambio de bases.

MO: Contenido de materia orgánica.

pH(H₂O): pH al agua.

pH(KCl): pH al cloruro de potasio.

CEAS: Coeficiente de estabilidad de agregados secos.

CEAH: Coeficiente de estabilidad de agregados húmedos.

IEST: Índice de estabilidad de agregados.

AS _{i - j} : Porcentaje de agregados secos entre i y j mm de diámetro.

AH _{i - j} : Porcentaje de agregados secos entre i y j mm de diámetro

D_a : Densidad aparente del suelo.

h : Distancia de separación entre pares de puntos considerados.

PTF: Función de Pedotransferencia.

PMP: Punto de marchitamiento permanente.

ADP: Agua disponible para la planta.

LSAD: Límite superior de agua disponible.

LIAD: Límite inferior de agua disponible.

CC: Capacidad de campo.

Otras denominaciones empleadas:

En suelos no saturados el valor del potencial matricial resulta negativo (menor que la presión atmosférica). Es por ello que, en relación a la curva de retención de humedad se emplean los siguientes términos.

Potenciales bajos de la curva: Se refieren a aquellos valores del potencial matricial que resultan más negativos o más alejados del origen y por tanto más pequeños desde el punto de vista numérico.

Potenciales altos de la curva: Se refieren a aquellos valores del potencial matricial que resultan menos negativos o más cercanos al origen y por tanto resultan mayores desde el punto de vista numérico.

Rango seco: Se refiere al rango de potenciales bajos de la curva que se corresponden con los menores contenidos de humedad.

Rango húmedo: Se refiere al rango de potenciales altos de la curva que se corresponden con los mayores contenidos de humedad.