

Figura 25. Relación $(1-I)$ vs h en diferentes suelos; A 02k (Ferralítico Rojo hidratado), B 03a (Ferralítico Amarillento lixiviado), C 07a (Húmico Calcimórfico), D 06d (Ferralítico Rojo).

La conversión del dato expresado como MO no genera errores. Al convertir los datos de materia orgánica, que ofrecen las distintas fuentes, a carbono, dividiendo por 1.724, sólo se está eliminando la manipulación aritmética realizada en el laboratorio.

Las curvas funciones, como ya se planteó, fueron confeccionadas sobre la base de la información obtenida en trabajos de caracterización de suelos, aparecidas en estudios que versaban sobre la génesis de los suelos, o bien tomada de Tesis de Doctorado (ver el Anexo 3 en CD-ROM), que representan a suelos mejor conservados, los supuestamente “típicos”; por esa causa, las curvas teóricas no representan el verdadero estado medio de las reservas de carbono de los suelos de Cuba. Los datos provenientes del servicio agroquímico y otros estudios, ofrecen por lo general, valores de carbono del horizonte superficial menores a lo que se hubiera esperado, de acuerdo a la función teórica.

No obstante, en el método empleado no se utiliza ese valor directamente, la curva se desliza, a lo largo del eje de la abscisas hasta adecuarlo al contenido de carbono en la capa superficial, como se explica en el acápite 2.4.3.3, considerando que la distribución vertical del carbono se ajusta a la misma ecuación $\pm \Delta h$, dentro de la especie de suelo.

El análisis de cientos de perfiles de suelos cubanos y la relativa baja dispersión de los valores en las curvas $COS = f(h)$ permiten aseverar que se conserva la forma de distribución siempre que exista la misma forma de acumulación y mineralización de la materia orgánica de los suelos, como ya se discutió.

3.2.2.1 Calidad de ajuste y comportamiento de los residuos con la profundidad

La desigual disponibilidad de información y la relativa falta de homogeneidad en los espesores de los horizontes de suelos de un mismo tipo, impidió el posible uso de promedios por profundidades para lograr mejores ajustes de los modelos seleccionados, este hecho condicionó una mayor dispersión y por ende bajos valores de R^2 en algunos suelos (algunos ya mostrados), fundamentalmente en las variables de densidad d_s e inclusiones $(1-I)$, lo cual implica necesariamente un aumento de la incertidumbre en los valores estimados a partir de dichos modelos, no obstante ser significativa la regresión y no significativa la falta de ajuste, parámetros dependientes del número de observaciones.

Pero como se verá, los errores que se introducen son de una magnitud similar al método tradicional, para la mayoría de los suelos.

El análisis de los residuos reportó en todos los casos la falta de homogeneidad de la varianza, debido a la diferenciación de los horizontes, resultado de los procesos de formación y el manejo, a partir de este hecho se caracterizan los errores para diferentes profundidades, según el tipo de suelo.

3.2.2.1.1 Suelos profundos sin inclusiones

Como ejemplo se presenta la curva del muy estudiado suelo Ferralítico Rojo típico sobre caliza dura (Figura 26A). La ecuación de Bleasdale se ajusta adecuadamente a la nube de puntos. El análisis de los residuos reporta un valor medio de ± 0.264 (SeM = 0.003).

Se puede decir que el error relativo inducido por la estimación del porcentaje del carbono en el horizonte superficial, es el mismo en el método propuesto que en el tradicional visto anteriormente, o sea alrededor del 10%, ya que ambos emplean directamente el dato del laboratorio y a que en los horizontes inferiores el error absoluto es poco importante.

Como se aprecia, a partir de 50 + 10 cm, los residuos son cercanos al valor de detección del método analítico empleado generalmente por los laboratorios agroquímicos. La mayor parte de la varianza pertenece a la capa superficial, esto puede ser explicado por el hecho de que la materia orgánica de los horizontes subsuperficiales es más estable que la de los horizontes superiores, lo cual se constata por su más alta edad media (Guerasimov, 1972).

El problema está entonces en determinar el error de estimación en el horizonte subsuperficial, en el cual puede encontrarse del 30 al 40% del carbono acumulado en los suelos minerales. El contenido medio de carbono, de la capa 20-50 cm es 0.96%, o sea que el error relativo más probable que se cometería si se empleara el valor medio sería del 27%, pero al no usar este valor directamente, el error de la estimación de carbono en el horizonte subsuperficial no está lejano al error producto de los análisis de muestreo y laboratorio.

3.2.2.1.2 Suelo erosionado con contacto lítico o paralítico

Para reafirmar lo planteado, se analizó la función correspondiente al suelo 04a (Pardo ócrico sin carbonatos) sobre roca intermedia (Figura 26B), suelo muy común en Cuba y que está generalmente erosionado, por ello se debe esperar falta de ajuste; sin embargo, se logra un buen ajuste exponencial del tipo $y = ae^{bx}$, con una desviación estándar residual (Sr) igual a 0.324 y un coeficiente de determinación R^2 de 0.841.

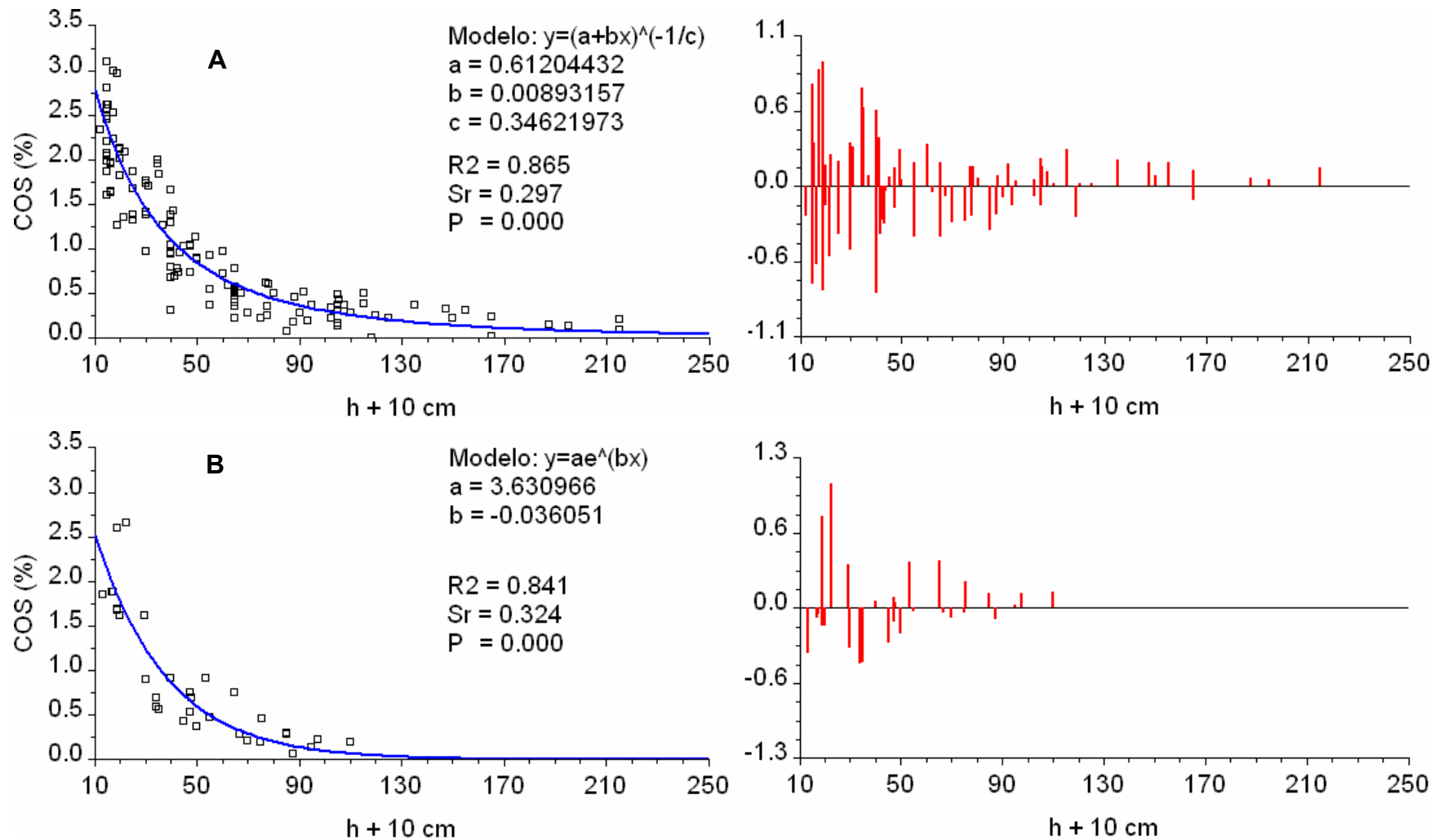


Figura 26. Residuos del ajuste de la función $COS=f(h)$, **A** suelo 02a (Ferralítico Rojo típico); **B** Suelo con contacto lítico o paralítico 04a (Pardo ócrico, con género sin carbonatos) sobre roca intermedia.

Debe tenerse en cuenta que estos suelos presentan contactos líticos o paralíticos con el horizonte C, por esta causa la función exponencial no podrá aplicarse en los suelos poco profundos. Para estos casos se ajustaron curvas diferentes para los suelos profundos y los casos de poco y medianamente profundos.

En el horizonte intermedio (20 - 35 cm) se encuentra alrededor del 20% de las reservas de carbono. El valor medio del residuo en esa capa es de ± 0.241 (SeM = 0.002), para un error relativo del 40%, elevado, como era de esperar.

En un trabajo anterior, Ortega (1975a) demostró la relación de esa variabilidad con la erosión en estos suelos. Aquí es especialmente efectivo el deslizar la curva por el eje de las abscisas para ajustar el valor superficial de carbono a la curva exponencial.

3.2.2.1.3 Suelos compactados

En el acápite del análisis de los errores del método tradicional (1.2.3), se vio la alta variabilidad de la densidad en el suelo, como ejemplo se muestra en la Figura 27, la d_s por profundidad para el 02a (Ferralítico Rojo típico) sobre caliza dura, que es sin dudas el suelo más estudiado de Cuba.

Esa variabilidad es especialmente alta en este suelo sobre explotado, compactado por la maquinaria agrícola, fertilizado de manera desmedida años atrás, laborado tan intensamente que inclusive están transformándose en suelos del subtipo compactado, que podrían fácilmente clasificarse como Nitosoles, según FAO (1988), debido al desarrollo de propiedades *níticas*.

Sin embargo, esa variación no introduce errores demasiado graves, puede apreciarse que en los residuos de la curva $d_s = f(h)$, aún para los puntos más alejados de la función, no alcanza el valor de 0.25 Mg.m^{-3} , el valor medio de los residuos está cercano a 0.1 Mg.m^{-3} , o sea el error medio inducido es alrededor del 8%, semejante, o inclusive inferior, al error de su determinación en campo.

En las fuentes analizadas se encontraron valores que fluctúan entre 0.85 y 1.35 Mg.m^{-3} en el horizonte superficial. El error que se comete al asumir valores a partir del criterio de experto, sobre la base de la información analítica existente no suele ser exagerado, en relación con el error que introduce la propia determinación.

3.2.2.1.4 Suelos con inclusiones

En un suelo como el 02k (Ferralítico Rojo hidratado) se forma gran cantidad de concreciones (alrededor del 10%), preferentemente en la parte media del perfil (Figura 28A). Los valores deducidos sobre la base de las descripciones de campo están cargados de subjetivismo, a lo cual se ha de añadir la variabilidad de los perfiles, que difieren entre ellos por la profundidad y potencia del horizonte altamente concrecionario. Por esas causas, la función cuadrática $(1-I) = a+bx+cx^2$ presenta un mal ajuste, el coeficiente R^2 es el más bajo obtenido con un valor de 0.142, y que puede ser considerado significativo solo para un 85% de probabilidad, pero con una falta de ajuste no significativa ($F = 1.524$, $P = 0.413$). A pesar de ello, el valor de los residuos no supera a 0.8, y como el valor medio de $(1-I)$ es $\cong 0.95$, se tiene un error relativo bastante bajo, entre el 6 y el 9%.

En los suelos con mayores contenidos de inclusiones como los pedregosos la situación es menos favorable. Por ejemplo, los 04 (Pardo Grisáceos) (Figura 28B) pueden presentar valores en los residuos de 0.15 para alcanzar errores relativos cercanos al 20%, lo que no es grave en este caso, ya que en la mayor parte de los suelos pedregosos, la acumulación de gravas aumenta hacia la base del perfil, donde la cantidad de materia orgánica es más baja. Por otra parte, se puede apreciar que en los primeros 20 cm, la variabilidad está muy limitada, y los errores se reducen a valores relativos menores del 1%.

Cuando la capa rica en inclusiones está en los horizontes intermedios, como en los suelos con concreciones consolidadas (mocarrero) y suelos con líneas de piedra (*stone line*). El error relativo del horizonte pedregoso puede llegar el 200%, esta fuente de error se precisa más adelante.

3.2.3 Ajuste de funciones teóricas

Las curvas teóricas, resultado de la multiplicación de los valores generados en la evaluación de las funciones de distribución vertical, presentan coeficientes de determinación muy cercanos a uno. En la Figura 29 se exponen curvas de suelos representativos ya discutidos.

Las curvas representan el contenido medio de reserva de carbono para el suelo en cuestión y el cálculo del área bajo la curva proporciona la reserva de ese suelo para el espesor de un perfil específico, corregido en función del desplazamiento que hubiese tenido en la curva de distribución vertical del carbono, según el procedimiento explicado en el acápite 1.4.3.3.

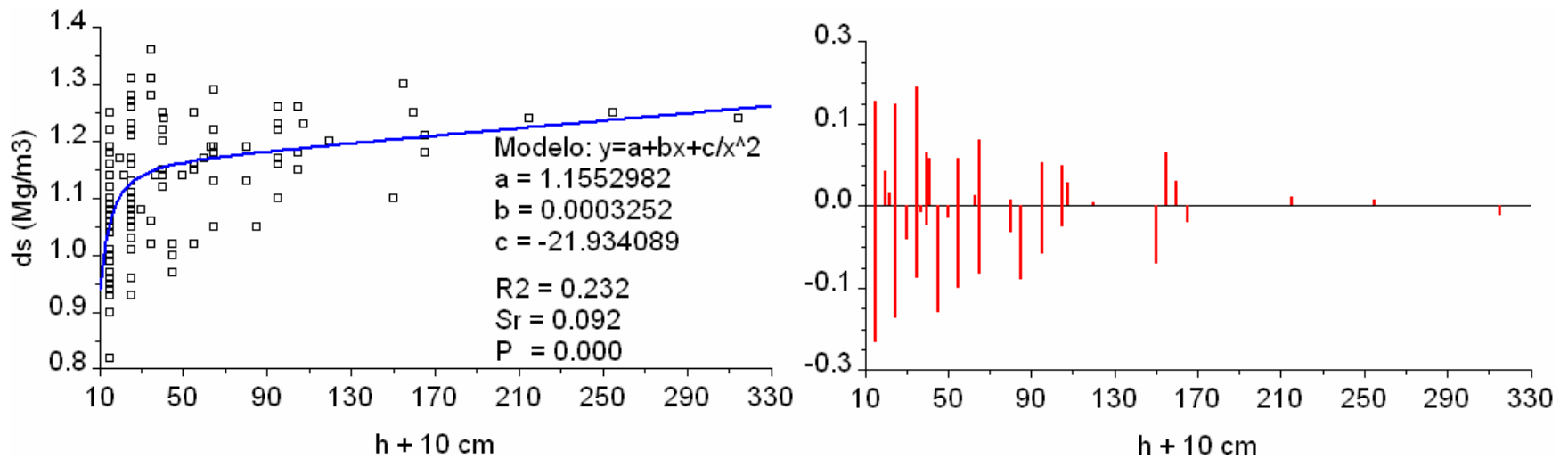


Figura 27. Residuos de la función $d_v = f(h)$, ajustada a un suelo 02a (Ferralítico Rojo típico) afectado por compactación.

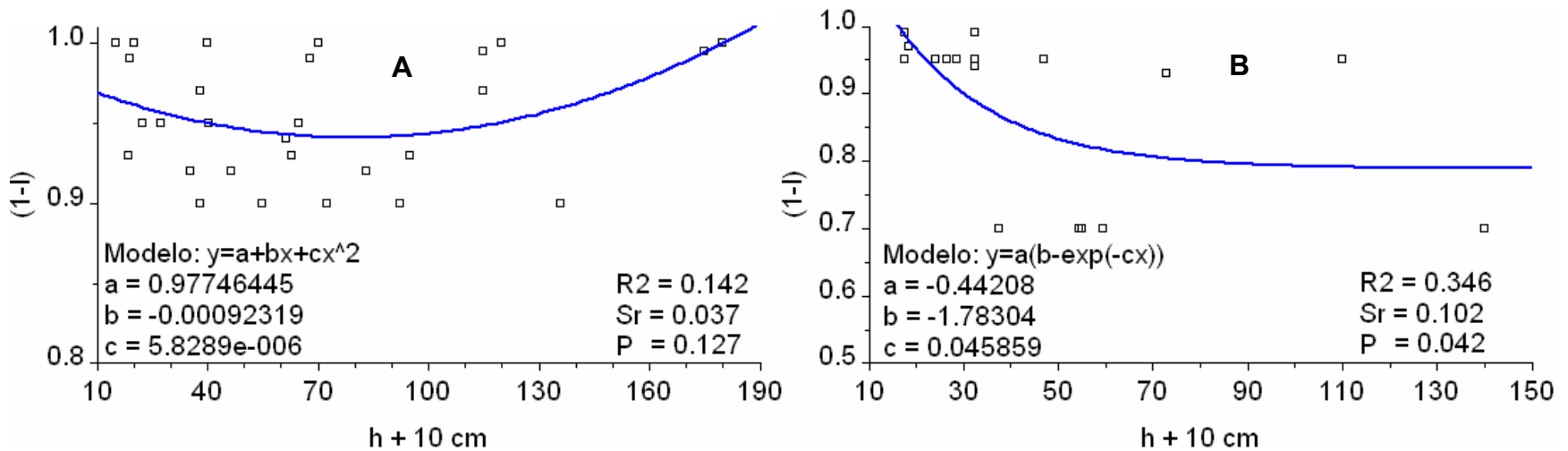


Figura 28. Ejemplos de ajuste de la función $(1-I) = f(h)$, en suelos con inclusiones; **A** 02k (Ferralítico Rojo hidratado), **B** 04acz (Pardo Grisáceo) sobre rocas ácidas.

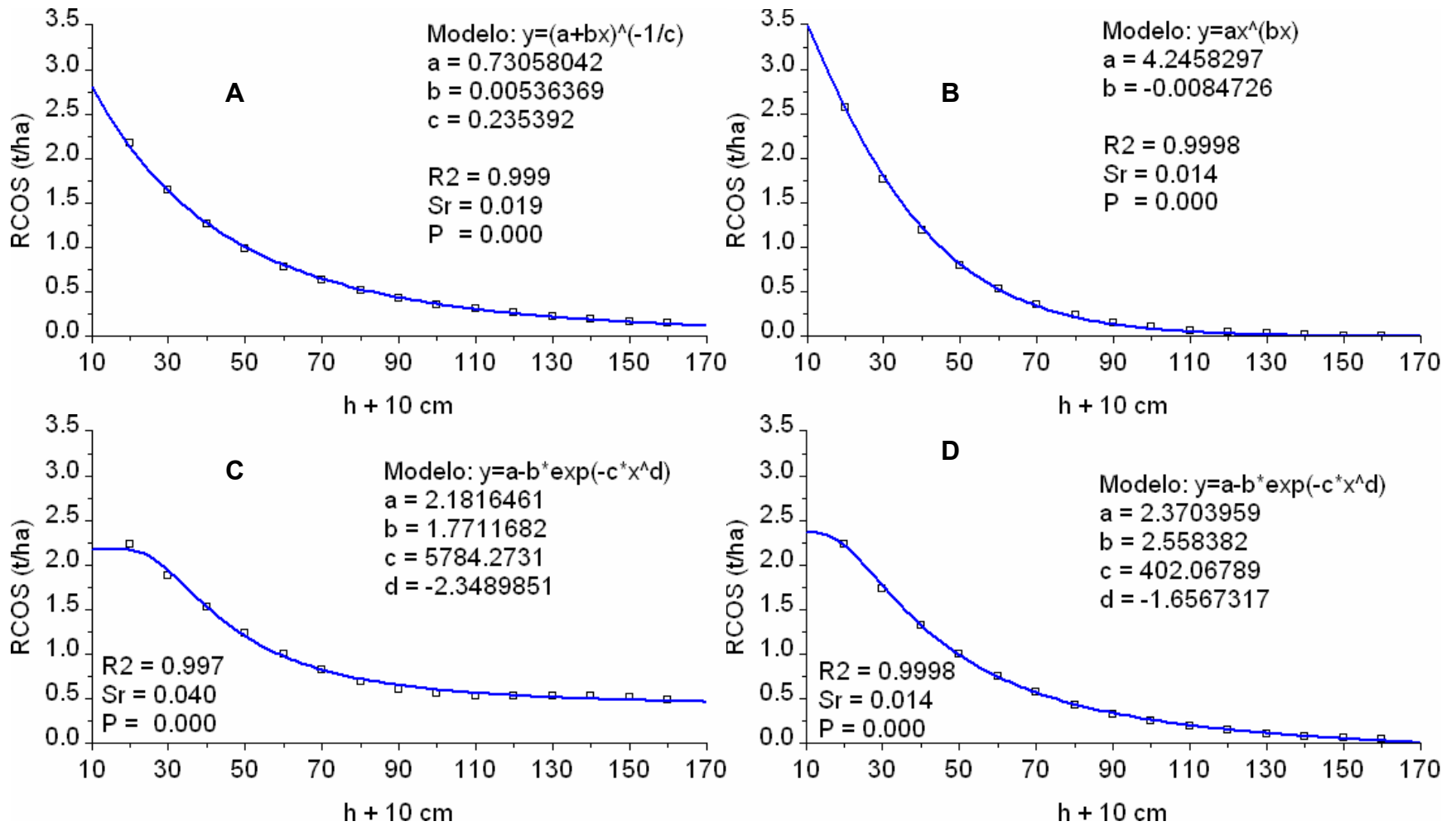


Figura 29. Ejemplos de curvas patrones de *RCOS* de suelos representativos. **A** suelo 02a (Ferralítico Rojo típico), **B** suelo con contacto lítico o paralítico 04a (Pardo ócrico, con género sin carbonatos), **C** 05a (Vertisol Pélico típico), **D** suelo con inclusiones 02k (Ferralítico Rojo hidratado).

3.2.4 Validación del procedimiento de estimación puntual

Resumiendo el acápite, las posibles fuentes de error de la utilización de modelos de distribución vertical del carbono y demás variables implicadas en el cálculo de la **RCOS** en un perfil, pueden resumirse en:

1. Error propio de la determinación de la materia orgánica.
2. La posible diferencia en la distribución vertical del carbono, entre la real (desconocida) y la teórica.
3. La posible diferencia de la densidad del suelo real y la media, cuando se utilizan estos valores.
4. El contenido de inclusiones.

La validación del procedimiento empleado en la determinación puntual de la **RCOS** a partir de la base de datos RCHabVal, donde se calculó la **RCOS** por el método tradicional (RCC) y la **RCOS** estimada por el procedimiento propuesto (RCE) para el primer horizonte de los perfiles, se presenta en la Tabla 15.

De los resultados, se puede concluir que la extrapolación del valor del contenido de carbono para el cálculo de las reservas de carbono del perfil completo, sobre la base de funciones de distribución vertical del carbono, genera errores comparables por su magnitud a cuando se realiza el cálculo tradicional, haciéndolo posible a partir de la información escasa e incompleta de perfiles de suelo. El análisis de los suelos de manera global, reporta que el error relativo del método está cercano al 20%, con un REMC de 0.70.

Los valores obtenidos indican un sesgo (EM) positivo en la estimación (se sobrestima la reserva de carbono), esto significa que para más del 90% de los perfiles validados (47) de la región Habana, los suelos presentan una mayor degradación o pérdida de la materia orgánica que aquella que se predice en las curvas patrones, existiendo diferencias significativas entre las dos series de datos (RCC, Med = 3.62 y RCE, Med = 3.89), de acuerdo a la comparación pareada de Wilcoxon para muestras relacionadas.

3.2.4.1 Influencia de las inclusiones

La estratificación de la población de datos de validación de acuerdo al porcentaje de inclusiones, permite precisar la influencia de esta variable.

En la Figura 30 se comprueba el efecto del aumento de las inclusiones sobre la raíz del error medio cuadrático (RECM, Tabla 15), puesto que el error cuadrático producto de las diferencias entre el valor estimado y el real puede crecer de manera exponencial cuando el contenido de inclusiones sobrepasa el 30%.

El principal suelo con esta situación es el 06d (Fersialítico Rojo) sobre caliza donde pueden aparecer capas de piedras desde la superficie debido a la acción de los procesos erosivos o cárcicos.

En resumen los suelos con altos contenidos de inclusiones el error de las reservas del perfil completo podrá llegar a ser de hasta el 50%, 100% o mayor, según el caso; pero dado que a mayor contenido de inclusiones el contenido de carbono es menor, aspecto que caracteriza a estos suelos, el error absoluto será de solo 1 ó 2 kg.m⁻², lo cual unido a la poca extensión que ocupan, no afectará significativamente el cálculo de las reservas totales de carbono en los suelos en Cuba o en una región específica.

3.3 Generalización espacial de la reserva de carbono orgánico de los suelos

Para el cálculo de la *RCOS* de un territorio o área dada, es necesaria la generalización espacial de la *RCOS* calculada en cada perfil, para ello debe adoptarse algún método de interpolación. Dado que la variabilidad espacial del carbono limita la precisión de la determinación, este aspecto debe tenerse especialmente en cuenta (Conant *et al.*, 2003), por lo que se discutirán los aspectos esenciales en relación a la variabilidad espacial del contenido de carbono del horizonte superficial y la reserva de carbono de los suelos minerales en Cuba.

3.3.1 Análisis de la variabilidad espacial

3.3.1.1 Variabilidad espacial del *COS* y la *RCOS* en la región Cuba

La forma alargada de nuestra Isla condiciona un muestreo anisotrópico en cualquier estudio que contemple al territorio nacional, de ahí la necesidad de estratificar el área de investigación, para facilitar su estudio.

Tabla 15. Validación del procedimiento de determinación de la *RCOS* (kg.m^{-2}) en el primer horizonte de perfiles de suelos de la provincia La Habana (RCHabVal).

<i>I</i> (%)	N	Med		EM	EMC	REMC	%Pob.
		RCC	RCE				
Validación Global							
Todos	47	3.62	3.89	0.16	0.48	0.70	90.4
Estratificación por contenidos de inclusiones							
<5	38	3.73	4.08	0.12	0.50	0.71	73.1
5-45	9	3.17	3.69	0.29	0.41	0.64	17.3
>45	5	1.13	4.85	2.78	8.91	2.99	9.6

RCC – *RCOS* calculada; RCE – *RCOS* estimada; EM – error medio; EMC – error medio cuadrático; REMC – raíz del error medio cuadrático; %Pob. - % de la población.

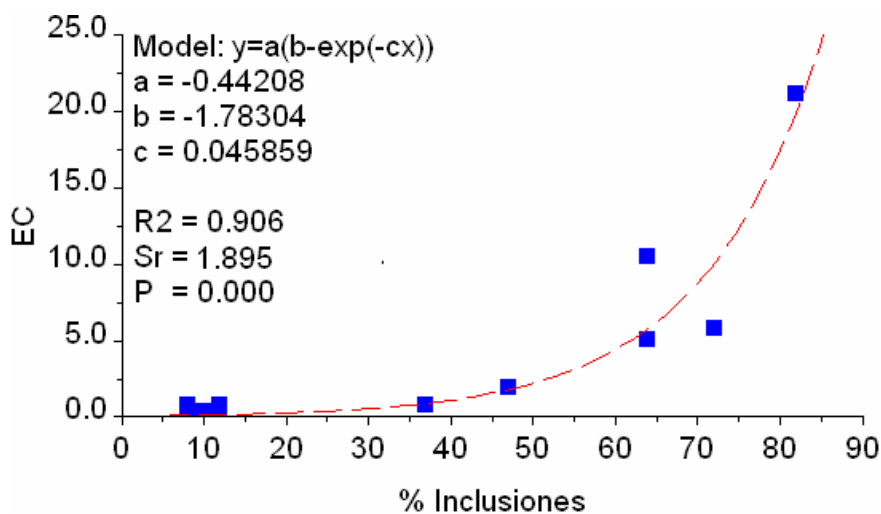


Figura 30. Aumento exponencial del error cuadrático (EC) entre la *RCOS* (kg.m^{-2}) estimada y *RCOS* calculada, para contenidos de inclusiones mayores de 5 %.

El análisis de la variabilidad espacial del carbono *COS* y de la reserva de carbono determinada hasta el horizonte C (*RCOS_C*) para las tres porciones del territorio nacional, occidente, centro y oriente (Figuras 31, 32, y 33) brinda una descripción del patrón espacial del comportamiento de dichas variables (Journel y Huijbregts, 1978; Webster, 1985; Goovaerts, 1997).

Los semivariogramas de los datos de los perfiles correspondientes a cada porción del territorio, muestran que no existe estructura espacial o ésta es muy débil, para las variables *COS* y *RCOS_C* a una escala de variación de 0.1 fracción de grado ($\approx 10\ 800$ m).

Esto es más notable en la porción central del país, donde se obtiene un efecto de varianza residual pura (*nugget* puro; McBratney y Webster, 1986) que denota un comportamiento completamente aleatorio de las variables a esa escala de medición y se reconoce por la fluctuación de los valores de semivarianza $\gamma(|h|)$ alrededor de la varianza estadística general de la muestra de población. No obstante, en las dos regiones restantes se puede observar cierta estructura a pequeños *lags* (0.01 fracción de grado, $\approx 1\ 080$ m), más pronunciada en la región occidental, por lo que puede inferirse la existencia de una estructura para distancias menores que 0.2 fracciones de grado (≈ 22 km).

En la región Habana se estudia con mayor detalle la estructura espacial de la *RCOS*, así como el efecto de la disminución del número de datos espaciales en diferentes métodos de interpolación, con el fin de selección y validación de un método de interpolación para toda Cuba.

3.3.1.2 Variabilidad espacial de la *RCOS* en la región Habana

En la Figura 14, se observó la relativa ausencia de valores en algunas zonas de la región de estudio, este es un problema frecuente de disponibilidad de datos. El efecto en el variograma es que la $\gamma(|h|)$ calculada para separaciones promedios (*lags*) menores que la distancia radial de la zona con ausencia de datos, puede no ser representativa de esa zona.

El semivariograma es sensible a la asimetría de las distribuciones y a la existencia del efecto proporcional (Goovaerts, 1997). El histograma de frecuencias de valores de la *RCOS* para los 1 560 perfiles distribuidos en la región Habana, se muestra en la Figura 34, el cual se acerca a una distribución normal. La Figura 35 presenta la variación de la media con la varianza en la zona de estudio, calculada mediante un procedimiento de ventanas móviles (13.8×6.9 km), la dispersión de los datos indica la ausencia del efecto proporcional.

El semivariograma isotrópico de los valores de **RCOS** para 1 560 perfiles en la región Habana y el modelo ajustado, se muestran en la Figura 36, el cual exhibe una buena estructura espacial. Ajustado a un modelo doble esférico, indica que los valores de **RCOS** pueden estar correlacionados hasta distancias de separación de 24 km, esto confirma los resultados obtenidos en el análisis variográfico de la región occidental, a partir de la base de datos de RCubPer.

Otros parámetros espaciales son: la varianza residual C0 (nugget) de 5.8 y los componentes espacialmente dependientes C (sill) de 3.7 y 3.5 para la primera y la segunda estructura respectivamente.

3.3.2 Selección, comparación y validación de métodos de interpolación

En la Tabla 16 se muestra la validación de los métodos de interpolación usados a “*priori*”. La lógica de la inclusión del subtipo de suelo como variable externa, se basa en los mismos principios que los que sustentan la generación de curvas teóricas para la estimación de la **RCOS** en un perfil, esto es la capacidad de predicción de suelos con iguales procesos de edafogénesis, teniendo en cuenta además su localización. Isaaks y Srivastava (1989) apoyan la idea de utilizar un descriptor de la tendencia que se base en la “... génesis del fenómeno...”. La utilización de una o más variables externas con el objetivo de mejorar la predicción ha sido utilizada con éxito para la estimación del carbono (Powers y Schlesinger 2002; Mueller y Pierce, 2003).

La validación mediante la base de datos RCHabVal, muestra que los resultados dependen del número de observaciones, y en todos los casos la estimación espacial produce un sesgo negativo reportado por el error medio (EM).

El KO resulta el mejor estimador cuando se utilizan los 1 560 puntos disponibles, en la medida que aumenta la escasez progresiva de información, deja de ser un buen estimador y cobran mayor importancia los métodos que utilizan una variable externa, debido a que es sensible al número de casos que existan en la vecindad del punto a estimar. Esto puede observarse en los mapas de la varianza kriging para diferente número de datos (Figura 37A, 1 560 perfiles y Figura 37B, 500 perfiles). Similares resultados obtuvieron Voltz *et al.* (1997).

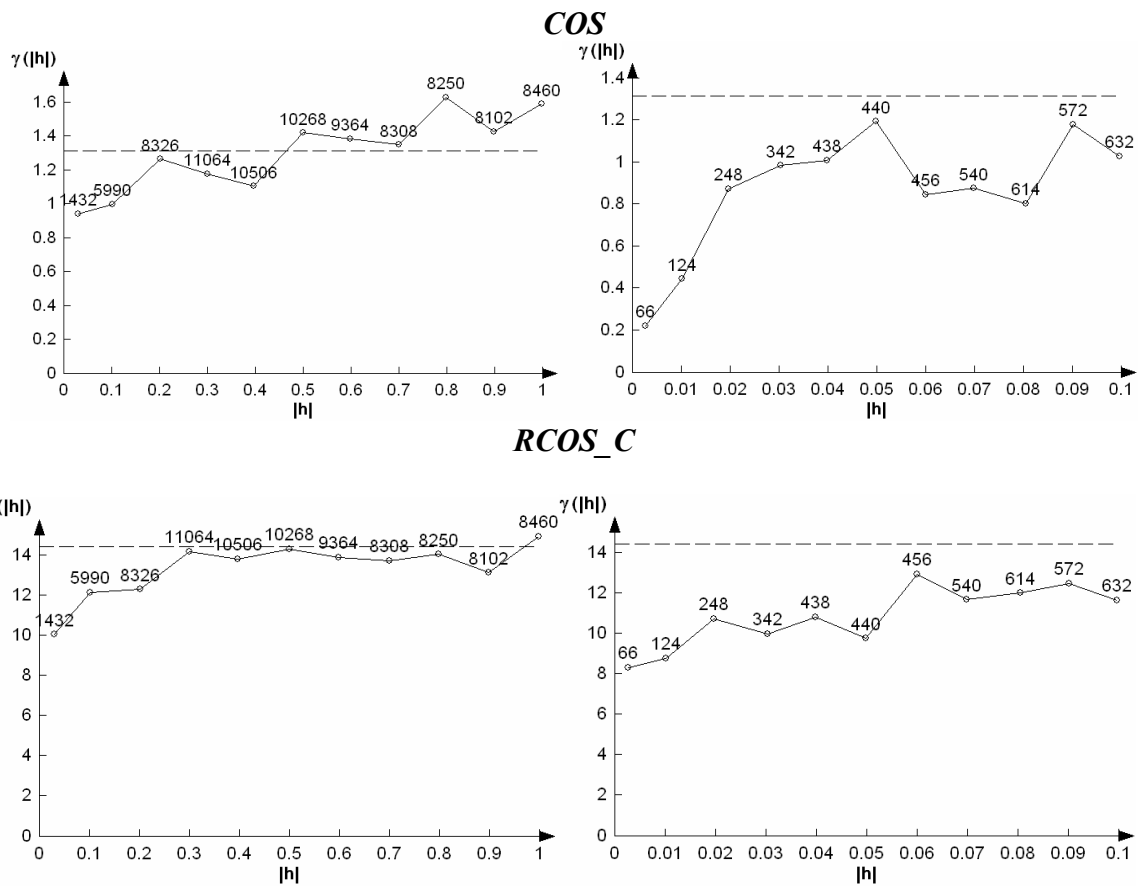
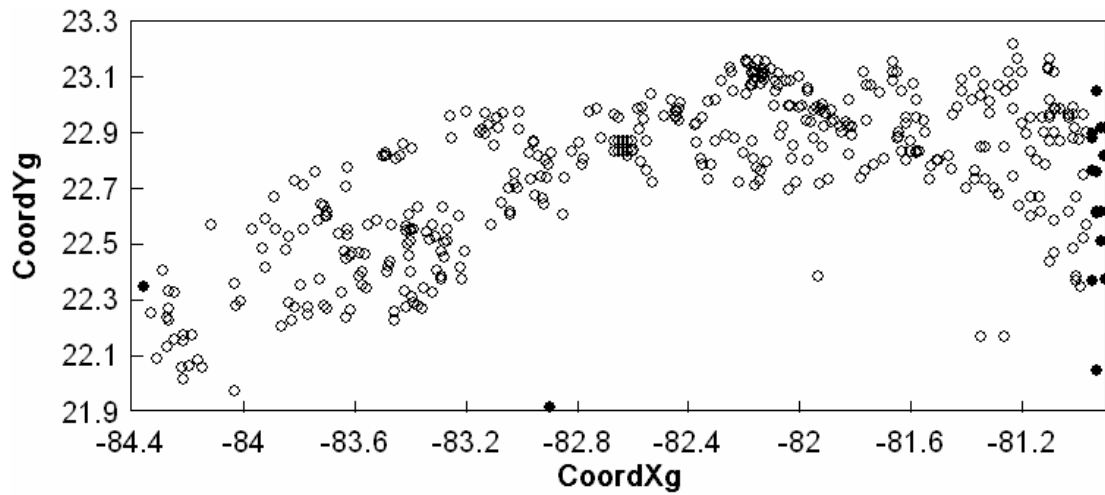


Figura 31. Distribución de los perfiles y semivariogramas experimentales de las variables *COS* y *RCOS_C* para dos escalas de variación (*lags*) 0.1 y 0.01 en la porción más occidental de Cuba.

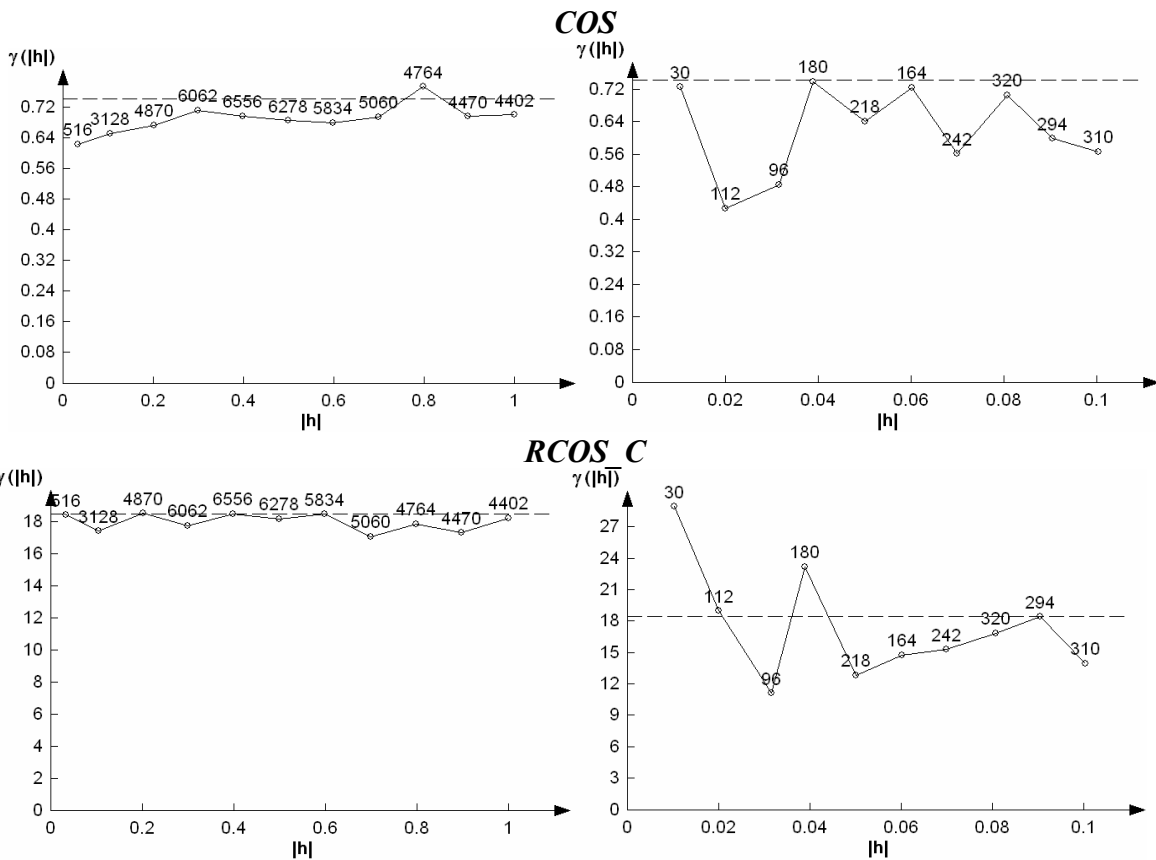
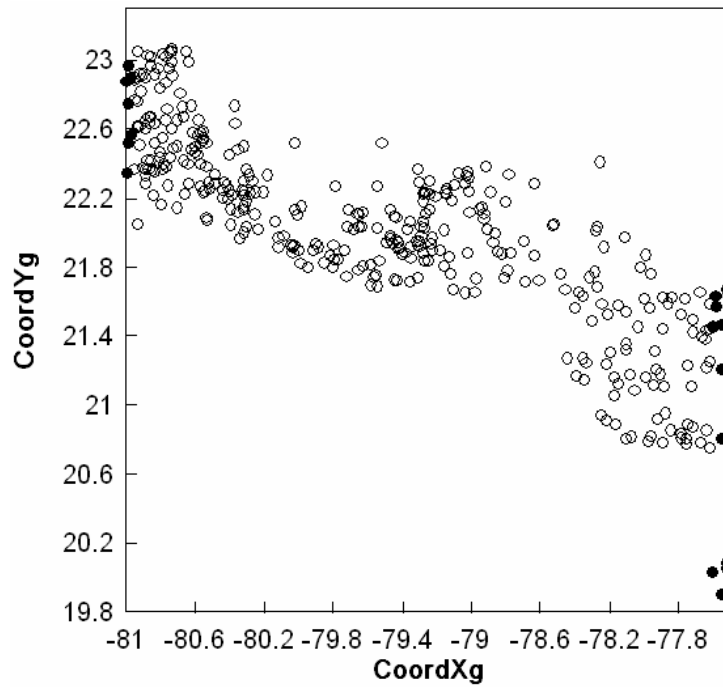


Figura 32. Distribución de los perfiles y semivariogramas experimentales de las variables *COS* y *RCOS_C* para dos escalas de variación (*lags*) 0.1 y 0.01 en la porción central de Cuba.

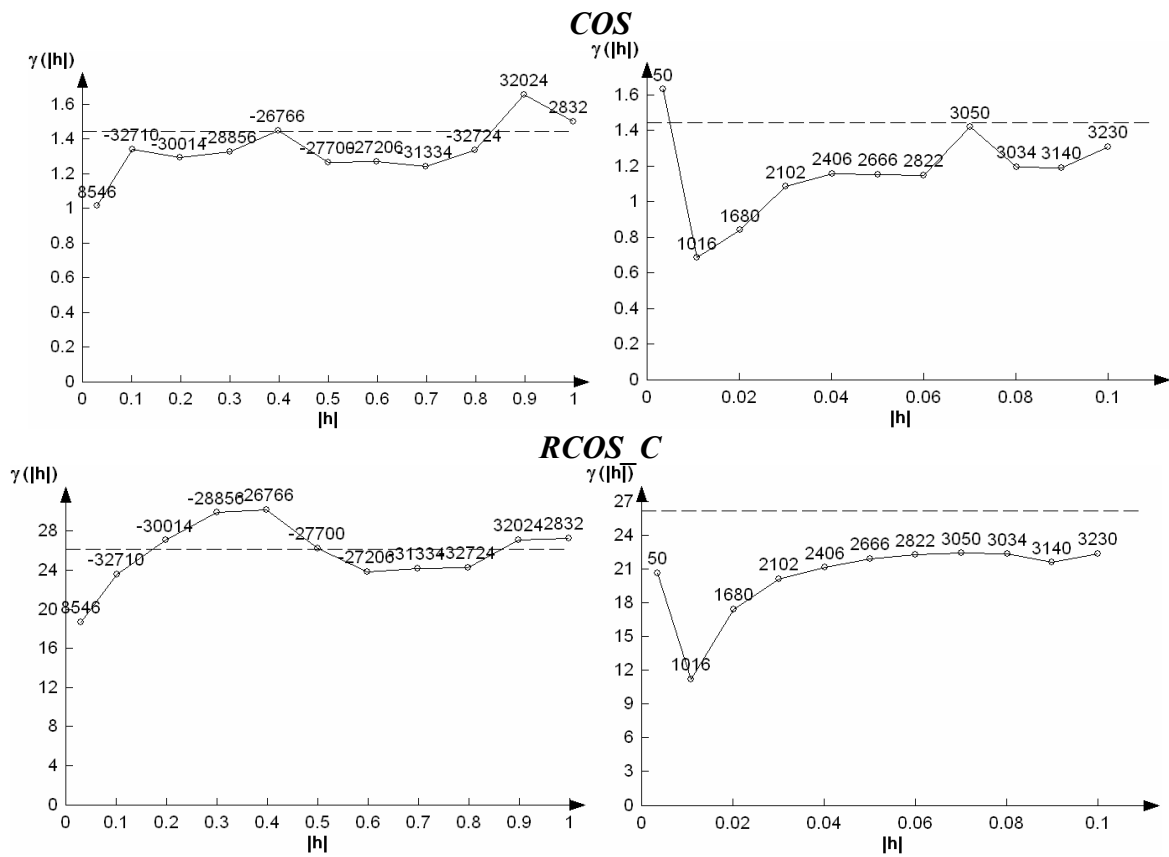
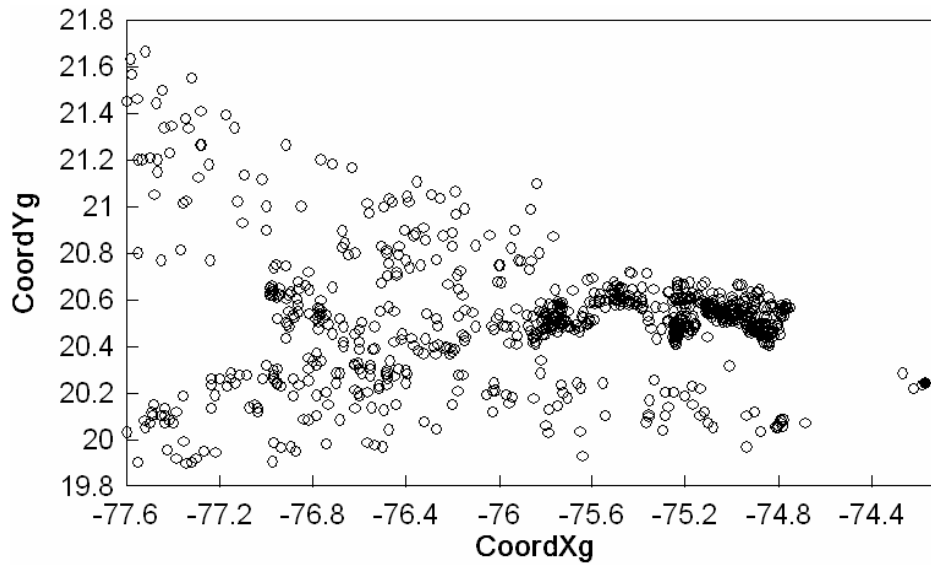
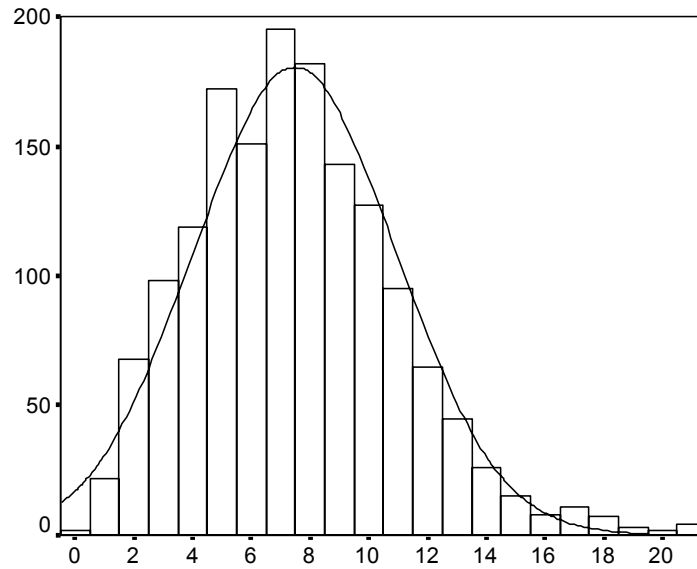


Figura 33. Distribución de los perfiles y semivariogramas experimentales de las variables **COS** y **RCOS_C** para dos escalas de variación (*lags*) 0.1y 0.01 en la porción más oriental de Cuba.



	N	Mínimo	Máximo	Media	SeM	Varianza	Asimetría	Curtosis	P KS
RCOS (kg.m⁻²)	1 560	0.03	20.94	7.48	0.087	11.851	0.607	0.585	0.025

Figura 34. Histograma de frecuencias y estadígrafos generales de los valores de **RCOS** para la región Habana.

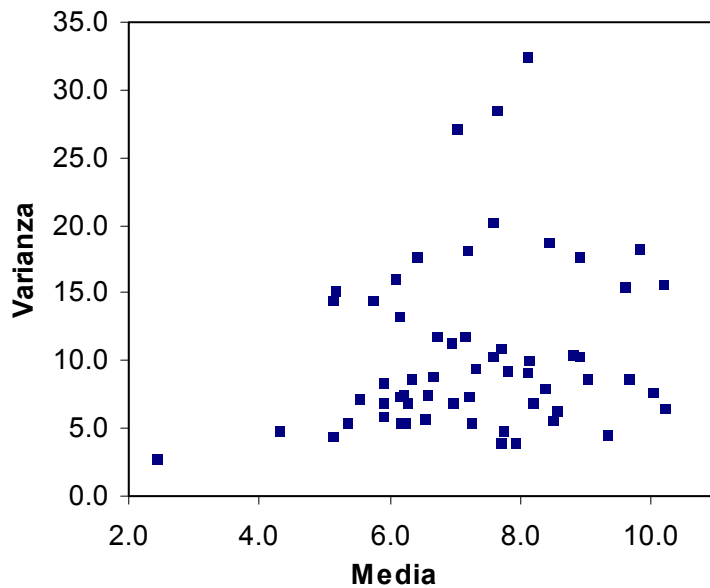


Figura 35. Comportamiento del valor medio local con la varianza local calculado para ventanas móviles sin solape de 13.8×6.9 km en la región Habana.

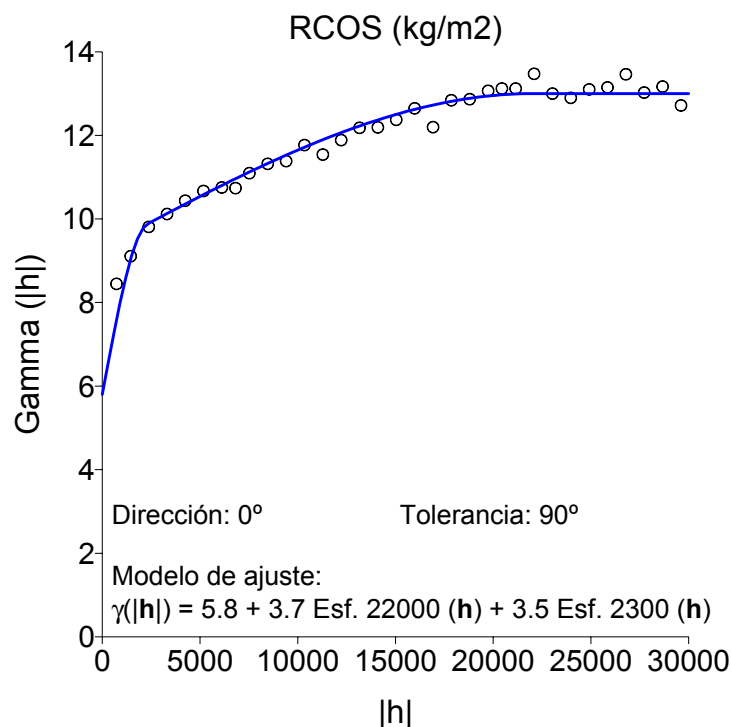


Figura 36. Semivariograma experimental de la *RCOS* (kg.m⁻²) de 1 560 perfiles de la región La Habana, ajustado a un modelo doble esférico (Esf.).

Tabla 16. Resultados de la validación de los métodos de interpolación usados en la generalización espacial de la *RCOS* (kg.m⁻²) puntual mediante la técnica de validación externa (*jackknifing*).

MÉTODO*	EM	EMC	REMC
Todos (1 560 perfiles)			
KO	-0.54	6.75	2.60
KSML	-1.36	7.21	2.68
KTE	-1.16	13.53	3.68
SIMUL (500 sGs)	-0.58	7.81	2.79
1 000 perfiles			
KO	-4.87	30.69	5.54
KSML	-0.90	8.14	2.85
KTE	-1.32	15.31	3.91
500 perfiles			
KO	-4.49	27.18	5.21
KSML	-1.01	7.93	2.82
KTE	-0.89	7.93	2.82
RCubPer			
CLAS	-0.46	8.06	2.84

EM- error medio, **EMC-** error medio cuadrático; **REMC-** raíz del error medio cuadrático.

* **KO** – kriging ordinario; **KSML** – kriging simple con media local; **KTE** – kriging con tendencia externa; **SIMUL** – Simulación Gaussiana para L número de sGs; **CLAS** – Clasificadorio.

En este caso la variable externa está representada por la media de la **RCOS** (kg.m^{-2}) de los perfiles incluidos en áreas de una misma especie de suelo, presentes en la región Habana, de acuerdo al mapa 1:250 000 (Figura 8A).

El KSML presenta la mayor estabilidad ante el cambio en el número de datos disponibles, debido a que con la ausencia de puntos en una vecindad específica para interpolar, toma más peso la variable externa. En este sentido, en la medida que se reduzca el número de datos, la estimación debe acercarse al valor de la media local (Goovaerts, 1997).

Con el KTE se obtienen resultados similares para el menor número de datos (500) pero resulta menos eficiente cuando la población de datos es mayor. Tal comportamiento se debe a que el KTE es sensible a cambios bruscos en la variable externa (Goovaerts, 1997) como es el caso de medias calculadas por polígonos.

Los resultados expuestos se confirman parcialmente con el resultado de una prueba T para muestras pareadas (Tabla 17), donde se obtiene que el promedio de las diferencias entre las observaciones extraídas de los mapas generados por el método clasificatorio (CLAS), la simulación Gausiana (SIMUL) y el kriging ordinario (KO), con respecto a los valores de validación (RCOS_Val), no difieren significativamente de cero, por lo que puede inferirse que las observaciones provienen de una misma población.

3.3.2.1 Incertidumbre de la estimación

En la Figura 38, se presenta la distribución de probabilidades acumulativas de la estimación de la **RCOS** (kg.m^{-2}) para los 1 560 datos de la región Habana, obtenidos por pos procesamiento de 500 realizaciones de una simulación Gausiana (500 sGs). La simulación condicional brinda muy buenos estimados del rango de valores posibles de un atributo en lugares no medidos (Burrough y McDonnell, 1998). Este tipo de estimado es necesario, en la modelación.

A partir del pos procesamiento de los L números de realizaciones podemos obtener el mapa del error relativo de la estimación (Figura 39) el cual no depende de la configuración espacial de los datos (muestreo) sino de la variable en sí misma. Puede compararse con el mapa de la varianza kriging, presentado en la Figura 37A, ya discutido, las zonas de más altos valores de errores se asocian a una región de inestabilidad con valores muy bajos de **RCOS** y no con la disponibilidad de información en esa área.

Al igual que en el análisis de los errores en la estimación puntual, la coincidencia de los mayores valores de error relativo, en este caso con zonas de bajos valores de RCOS, significa que el error absoluto se minimiza y no afecta grandemente a la estimación total en el territorio. La simulación condicional, en este sentido, puede ser usada como estimador no exacto, rindiendo resultados similares al kriging ordinario (KO) y al kriging simple con media local (KSML) (Tabla 16), para las zonas con disponibilidad de información, como se muestra en las Figuras 40, A y B.

No obstante el costo computacional es significativamente más alto y debe tenerse en cuenta. La simulación condicional de 500 realizaciones por sí sola, llevada a efecto en un procesador Celeron 1GHz, con 250 Mb de RAM, demoró 20 minutos.

3.3.2.2 Validación del método clasificatorio

El método de interpolación por asignación es una alternativa viable siempre que se cumplan los presupuestos de independencia espacial de los datos a interpolar.

Si se compara el resultado de la interpolación mediante el método clasificatorio no geoestadístico (CLAS), donde no intervienen los perfiles de suelo de la base de datos RCHabPer, sino el valor medio de **RCOS** por tipo de suelo, zona, presencia de vegetación forestal natural o cultivada y ubicación geográfica, obtenido del análisis de la base de datos RCubPer, se comprueba que funciona de manera adecuada, cuando la información disponible es pobre, con valores de $REMC^{CLAS}$ igual a 2.84 por el $REMC^{KSML}$ y el $REMC^{KTE}$ de 2.82, que constituyen el mejor rendimiento en condiciones de escasa información. Por lo tanto, es razonablemente adecuado cuando por la misma causa de falta de información, no se pueden aplicar los métodos geoestadísticos.

La aplicación de los métodos geoestadísticos depende no solo del número de datos disponibles, sino de la existencia de estructura espacial a la escala de medición y la posibilidad de obtener un buen variograma, pues su calidad determina la calidad de la estimación (Isaaks y Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997; Webster y Oliver, 2001).

Del análisis anterior se puede afirmar que, como la población de perfiles puede considerarse espacialmente aleatoria para la escala de variación mayor de 0.2 fracciones de grado (≈ 22 Km) en el territorio de Cuba, es posible entonces aplicar un método de interpolación clasificatorio (Burrough y McDonnell, 1998) que use la media como estimador sobre la base de información externa, en la generalización de la reserva de carbono para todo el territorio nacional.

Tabla 17. Comparación pareada entre las observaciones provenientes de mapas generados por diferentes métodos de interpolación y los datos de validación (RCOS_Val).

N=46	Media	S	SeM	P	RCOS_Val	Comparación pareada				
						vs	Corr.	P	t	g.l.
RCOS_Val	8.77	2.32	0.34	0.833						
CLAS	8.01	2.55	0.38	0.315	CLAS	0.094	0.538	1.624	44	0.111
SIMUL	7.96	1.52	0.22	0.806	SIMUL	-0.038	0.801	1.940	45	0.059
KO_1600	8.10	1.71	0.26	0.862	KO_1600	-0.023	0.878	1.623	44	0.112
KSM_1600	7.47	1.42	0.21	0.019	KSM_1600	-0.107	0.468	2.893	47	0.006
KTE_1600	7.41	2.34	0.35	0.668	KTE_1600	-0.028	0.852	2.759	45	0.008

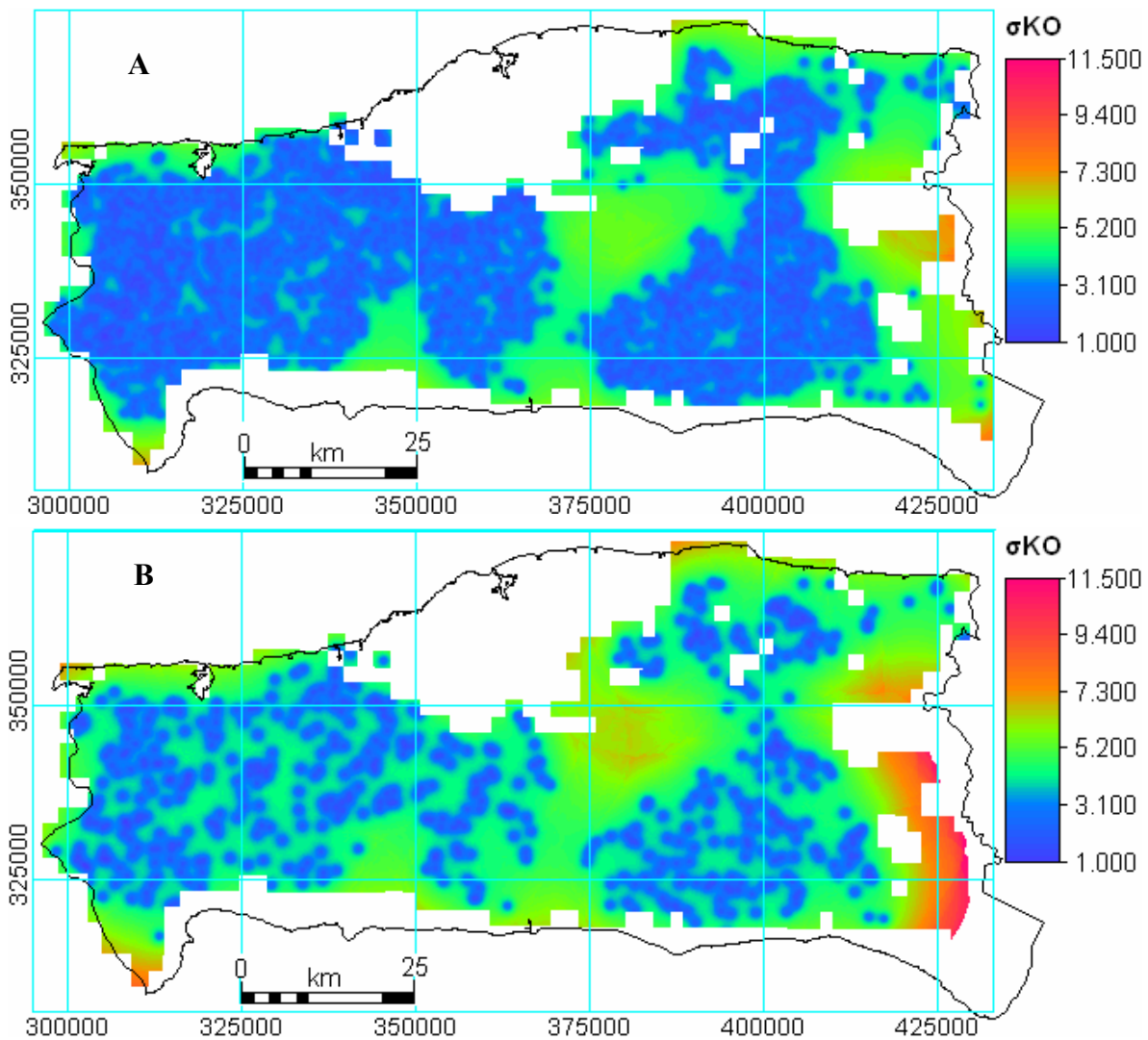


Figura 37. Mapa de la varianza kriging (σ^{KO}) obtenida de la interpolación con el estimador kriging ordinario. A. 1 560 perfiles; B. 500 perfiles.

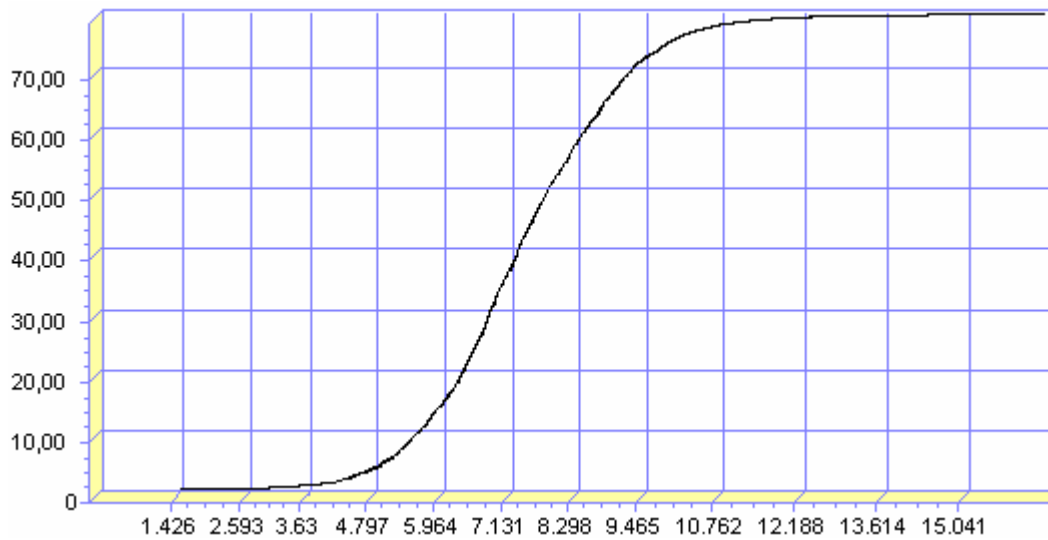


Figura 38. Distribución de probabilidades acumulativas del mapa de valores medios resultante del pos procesamiento de 500 sGs (simulaciones Gaussianas) por el método de Monte Carlo, a los valores de $RCOS$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) de 1 560 perfiles de la región La Habana.

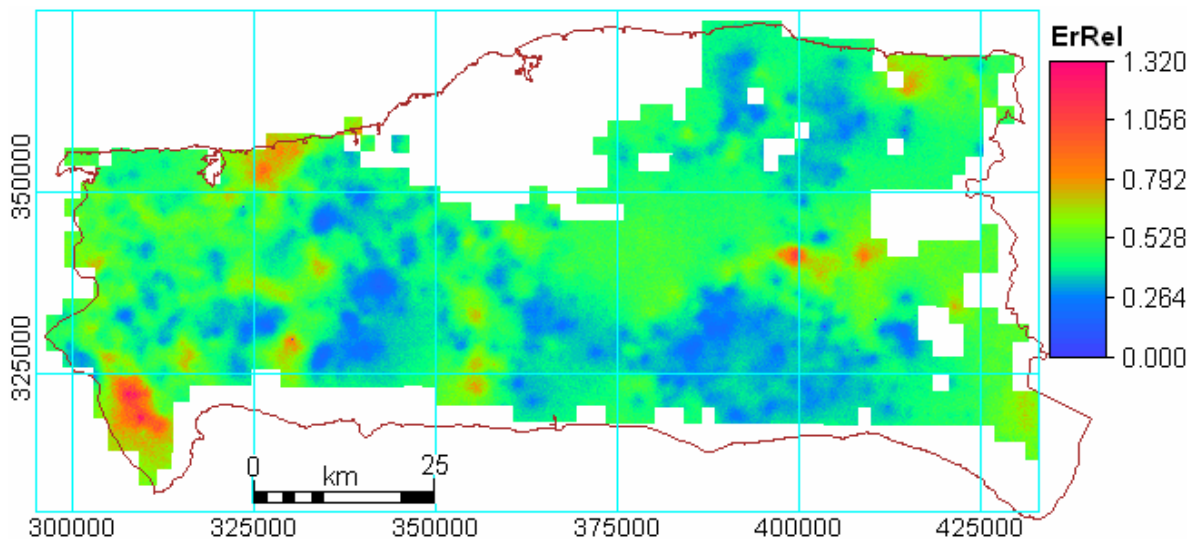


Figura 39. Mapa de error relativo de la estimación utilizando los datos de $RCOS$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) de 1 560 perfiles de la región La Habana, resultado del pos procesamiento de 500 sGs (simulaciones Gaussianas) por el método de Monte Carlo.

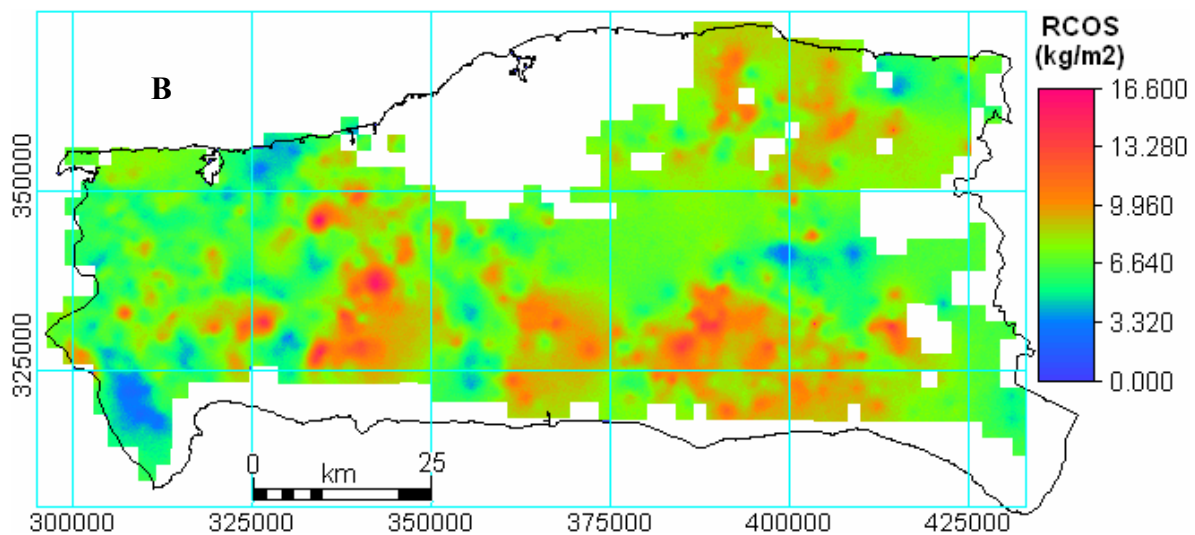
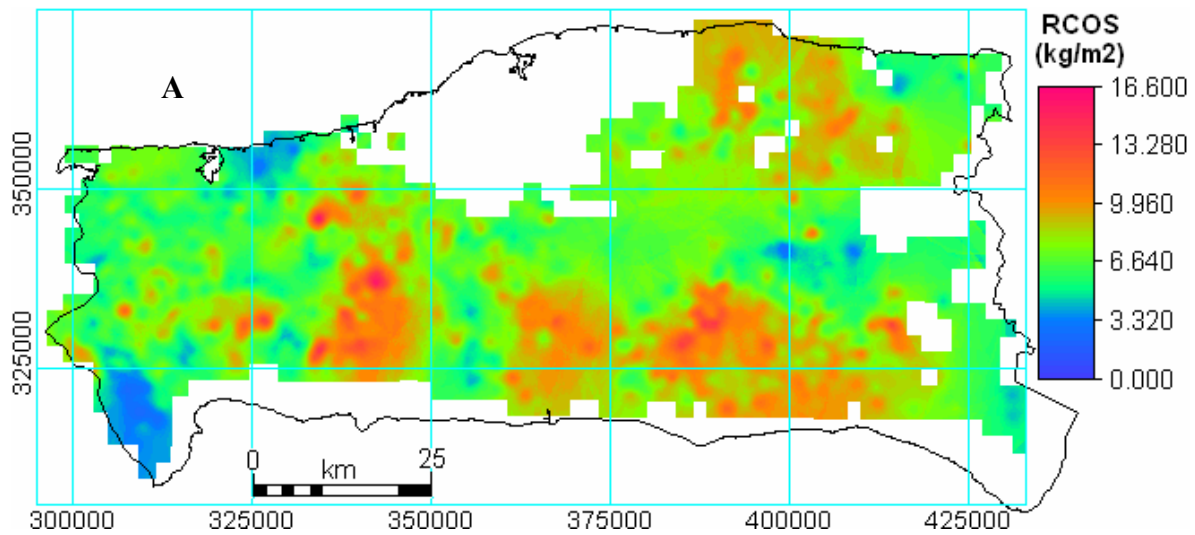


Figura 40. Estimación de la *RCOS* (kg.m⁻²) en la región Habana. **A.** Kriging Ordinario (KO); **B.** Valor medio resultado del pos procesamiento de 500 sGs (simulaciones Gaussianas) por el método de Monte Carlo.

Para estudios regionales o locales a escalas más detalladas, la decisión del método de interpolación a usar, dependerá de la disponibilidad de información y de la existencia de estructura espacial.

No obstante, la incorporación del suelo como variable externa mejora la calidad de la predicción de los métodos geoestadísticos, sobre todo en caso de que aunque se puedan aplicar dichos métodos, exista poca disponibilidad de información.

En caso de aplicar métodos de interpolación geoestadísticos, la aplicación de la simulación estocástica, permitirá conocer los errores probables de la estimación espacial a partir de la información disponible y ella en sí misma puede constituir un método de estimación espacial.

3.3.3 Cálculo espacial de la RCOS para Cuba. Aplicación del método clasificatorio

3.3.3.1 Asignación de valores medios de reserva a cada especie de suelo

Las diferentes combinaciones que pueden formar 16 tipos de suelos, 18 subtipos, 14 géneros solos o combinados, 3 especies y 4 subespecies (estas últimas añadidas, para poder asignar otros atributos a los suelos: humus forestal, escabroso, etc.), rinden un número alto de grupos diferenciados. Dentro de las 36 080 celdas aparecen un total de 386 individuos edáficos diferentes. El cruce de mapas (*overlay*) generó un error de solo el 15%.

La información recabada permitió generar valores medios bien establecidos para los principales suelos de Cuba. Como era de esperar, los coeficientes de variación (CV) son elevados; por ejemplo, en el suelo 02a (Ferralítico Rojo típico) alcanza un 27%, para un valor medio de 10 kg.m⁻² (SeM = 0.3).

3.3.3.1.1 Diferencias provinciales

A pesar de los altos coeficientes de variación en algunas clases se detectaron diferencias provinciales o regionales. Por ejemplo, en el mismo 02a (Ferralítico Rojo típico), su valor medio para la provincia de La Habana fue de 11.2 kg.m⁻² (SeM = 0.4) y en la vecina Matanzas es de sólo 9.4 (SeM = 0.5), moviéndonos más al Este encontramos 12.7 (SeM = 0.1) en Cienfuegos y 13.0 (SeM = 0.7) en Ciego de Ávila. Este hecho, resultado de diferentes factores, entre los que se encuentran condiciones particulares de formación relacionadas con el proceso de humificación y el uso histórico de la tierra, adelanta la necesidad de discriminar las diferentes regiones para la

generalización espacial de los valores medios de la **RCOS**, para lo que se utilizó el mapa de división política administrativa de Cuba (provincias) agrupadas en tres regiones: Occidental, Central y Oriental; tal como ocurre con los cambios que experimentan iguales clases taxonómicas de suelo con la altura en zonas de relieve disectado.

3.3.3.1.2 Zonalidad vertical

La existencia de una zonalidad vertical que se expresa desde relativamente bajas alturas, al menos para las provincias orientales, es un hecho que se viene tratando de introducir en la mentalidad de los edafólogos cubanos hace ya 20 años (Hernández *et al.*, 1980), y en el caso de las reservas de carbono se manifestó con cierta claridad a pesar de la ocasional pobreza de datos. Así se ve, por ejemplo que los 06e (Pardos Cálcidos) en la franja más alta y por tanto húmeda tienen como promedio 8.0 kg.m^{-2} (SeM = 1.3) de carbono, mientras que en la franja más baja alcanza apenas la mitad (4.5 , SeM = 0.8 kg.m^{-2}). Por esa causa en la antigua provincia de Oriente se separó la zona montañosa (z02, z06), y la franja costera sur (z05) como si fueran unidades subprovinciales (Figura 41).

3.3.3.1.3 Régimen hídrico

Los suelos Rendzina que se desarrollan en condiciones de alta humedad en las Penínsulas de Guanahacabibes y Zapata (z03, z04) se diferencian de los similares en sus respectivas provincias, por lo que se vio la necesidad de separar esas zonas como una región independiente.

Fue preciso también separar a la Sierra de Cubitas en Camagüey (z01), para diferenciar los suelos Ferríticos de antiguos peniplanos de los suelos Ferríticos más jóvenes que predominan en esa Sierra.

3.3.3.1.4 Vegetación

La mayor parte de la información analizada se corresponde a suelos agrícolas, en los cuales su prolongado uso ha reducido sustancialmente el contenido de materia orgánica, por tanto, es ineludible separar las regiones con vegetación natural o de plantaciones forestales, lo que se realizó a partir del mapa topográfico 1:250 000 (Figura 42).

En el ejemplo del suelo 07a (Húmico Calcimórfico típico) (Figura 43) se constata que el valor superior a 21 no pertenece a esa población, por lo que fue integrado con los forestales. De todas

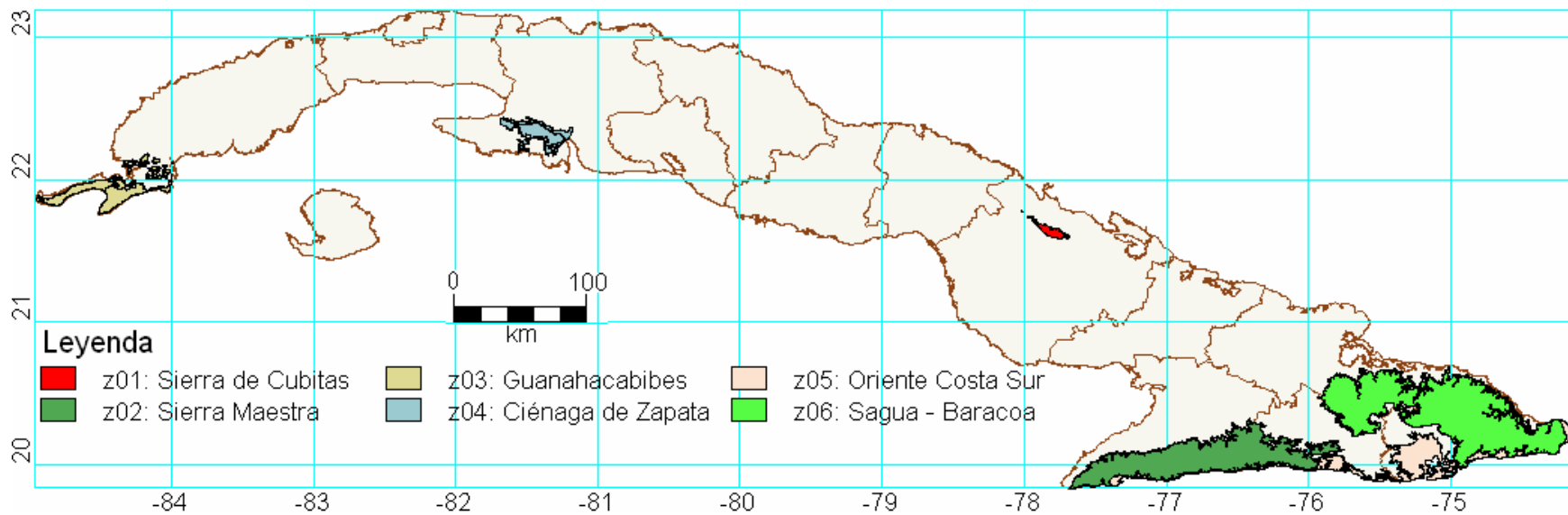


Figura 41. Regiones diferenciadas por su ubicación geográfica y Zonas diferenciadas en los procesos de acumulación de humus en cuanto a criterios de edad de los peniplanos (z01), ley de distribución vertical (z02, z06) y régimen de humedad (z03, z04, z05).

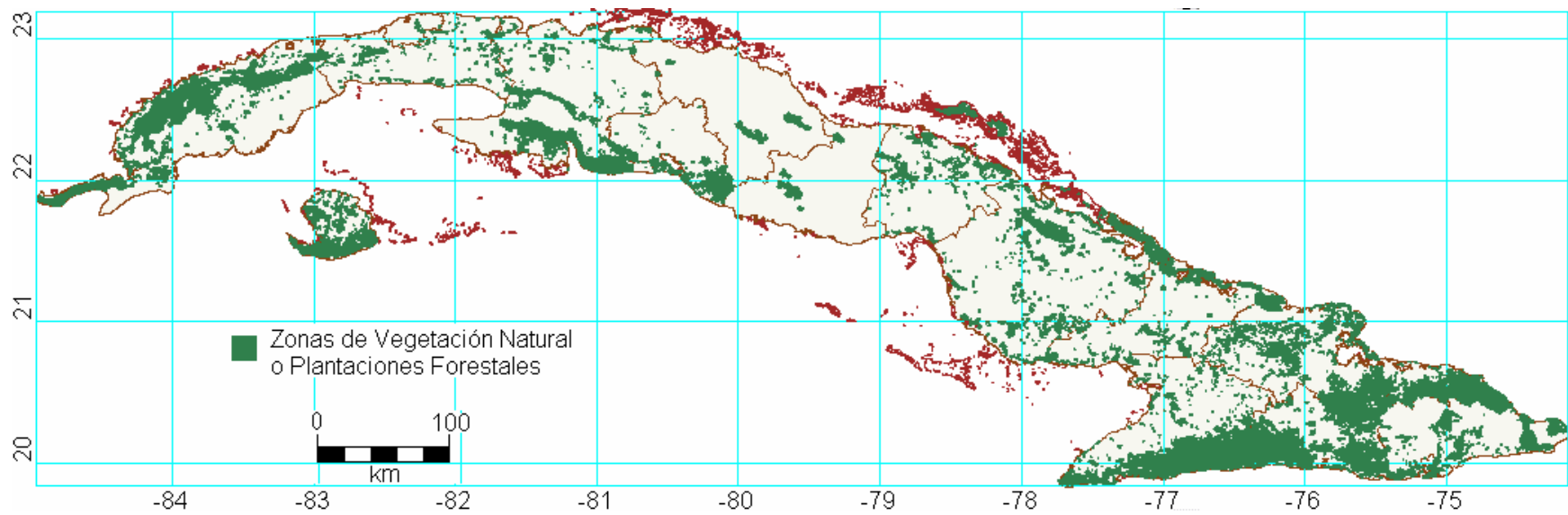


Figura 42. Criterio de diferenciación por el tipo de vegetación natural o de plantaciones forestales derivado del mapa topográfico 1:250 000, de acuerdo a la leyenda de ocupación del suelo propuesta por Ponvert (2000).

formas, la información fue más escasa que la obtenida para los suelos agrícolas, por ello no se asignaron promedios provinciales, se dieron valores para Cuba Occidental, Central y Oriental, así como para las regiones ya mencionadas.

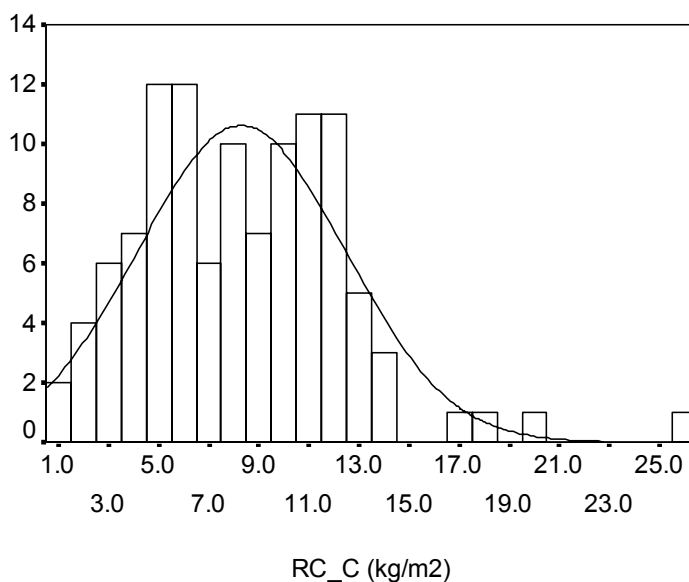


Figura 43. Histograma de la reserva de carbono del suelo 07a (Húmico Calcimórfico típico).

3.4 Principales resultados del análisis del contenido y la reserva de carbono de los suelos minerales de Cuba

3.4.1 Las variables analizadas

De acuerdo con el análisis de normalidad (Tabla 18) solo la *RCOS* calculada hasta 100 cm de profundidad (*RCOS_100*) muestra valores de probabilidad que permiten aceptar que la distribución se acerca a una distribución normal, incluso después de desechar valores extremos con muy baja ocurrencia (*outliers*), esto es debido fundamentalmente a la asimetría de las distribuciones provocada por la escasez de valores altos de carbono, profundidad de los suelos y reservas, como se aprecia en los histogramas de las variables (Figura 44), con la excepción de los valores de la diferencia entre la profundidad de la muestra real y el encontrado en la curva patrón, que sí exhiben una simetría.

Estos resultados confirman la conveniencia de usar pruebas estadísticas no paramétricas para hacer inferencias acerca de que diferentes muestras provengan de la misma población (Siegel, 1987).

3.4.2 La profundidad de los suelos

La profundidad de los suelos es un factor importante en los trópicos y es a su vez determinante en la cuantía de la reserva de carbono. Kauffman *et al.* (1995), establecieron que de forma contraria a la "...expectación general..." el análisis de 176 perfiles de referencia de los principales suelos de los trópicos húmedos de todo el mundo, reportó que el carbono se acumula en el subsuelo de dichos suelos, a pesar de los colores claros que presentaban (Hue 5 a 10YR y Value/Chroma 4/5 a 6/8) indicativos de un contenido de materia orgánica mucho más bajo en suelos extra tropicales. Se destaca además, la importancia de dicha acumulación en la disponibilidad de agua para las plantas y la retención de nutrientes.

Los valores de Reserva de Carbono calculados hasta las profundidades de 50 cm (**RCOS_50**), 100 cm (**RCOS_100**) y hasta la profundidad en que aparece el horizonte C (**RCOS_C**), difieren significativamente de acuerdo a una prueba de Friedman para k muestras relacionadas (Tabla 19), lo que indica que no se puede menospreciar el aporte de los horizontes inferiores a la cuantía total de la reserva calculada, aunque Detwiler (1986) considera que no hay efecto sobre el carbono por debajo de 60 cm en ningún Tipo de Utilización de la Tierra (TUT) y Kimble *et al.* (1990) consideran el carbono activo hasta los 50 cm. Este último autor comparó los valores medios de reservas calculadas para 30, 50 y 100 cm, para diferentes suelos del mundo.

A pesar de ello, la comisión de carbono terrestre del INQUA¹⁷ estima que los valores reportados de reserva de carbono del suelo y turberas por Eswaran *et al.* (1993) en los primeros 100 cm de profundidad, claramente subestiman el volumen del reservorio de suelos minerales y turberas (Histosoles).

En lo adelante, se hará más énfasis en el análisis de la reserva calculada hasta la máxima profundidad que alcanza el *solum* en los perfiles (**RCOS_C**).

¹⁷. [INQUA Terrestrial Carbon Commission](http://www.esd.ornl.gov/projects/gen/pool.htm). Estimates of total carbon storage in various important reservoirs. Compiled by Jonathan Adams, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory. <http://www.esd.ornl.gov/projects/gen/pool.htm>

Tabla 18. Estadígrafos de posición y dispersión calculados para las variables de los perfiles considerados para Cuba.

		PROF (cm)	COS (%)	PROF_C (cm)	DIFER (cm)	RCOS_50 (kg/m²)	RCOS_100 (kg/m²)	RCOS_C (kg/m²)
Criterios de exclusión		-	>5	≤5 or ≥250	>75	>20	>22	>22
N	Válidos	1637	1622	1606	1636	1226	686	1612
	Excluidos	0	25	10	7	6	3	13
Media		20.14	1.88	93.55	12.15	7.52	9.23	8.73
SeM		0.178	0.023	1.31	0.390	9.66E-02	0.157	0.106
Moda		20.00	1.00	150	3.10	3.94*	8.84	5.00
S		7.20	0.919	52.41	15.782	3.3846	4.1035	4.2733
Mínimo		3	0.10	5	-49.03	0.32	0.40	0.27
Máximo		70	4.99	250	73.51	19.21	21.71	21.93
P		0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.323	0.000

PROF - profundidad del horizonte superficial; **COS** - Carbono; **PROF_C** - profundidad del perfil hasta el horizonte C; **DIFER** - diferencia en el ploteo de la profundidad de la muestra con respecto a la curva patrón; **RCOS_n** - reservas de carbono calculadas para diferentes profundidades; * Múltiples modas, se muestra el primer valor encontrado; P - Probabilidad asociada de dos colas según la prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov.

Tabla 19. Resultados de la prueba de Friedman para los valores de reserva de carbono (**RCOS**) calculados a diferentes rangos de profundidades.

Rangos	Rango medio (Kg/m²)	Prueba	
		N	681
RCOS_50	1.01	Chi-Cuadrada	1299.204
RCOS_100	2.04	gl	2
RCOS_C	2.94	P	.000

Tabla 20. Niveles interpretativos del contenido de carbono en % de los suelos y frecuencia de valores del primer horizonte por rango en los perfiles analizados para toda Cuba.

Nivel	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Rango	<0.4	0.5 – 0.9	1.0 – 1.9	2.0 – 5.0	>5.0
Frecuencia	50	190	769	613	25 [♠]
Media	0.31	0.76	1.51	2.81	8.69
S	0.10	0.14	0.30	0.70	5.73

♠ Valores excluidos.

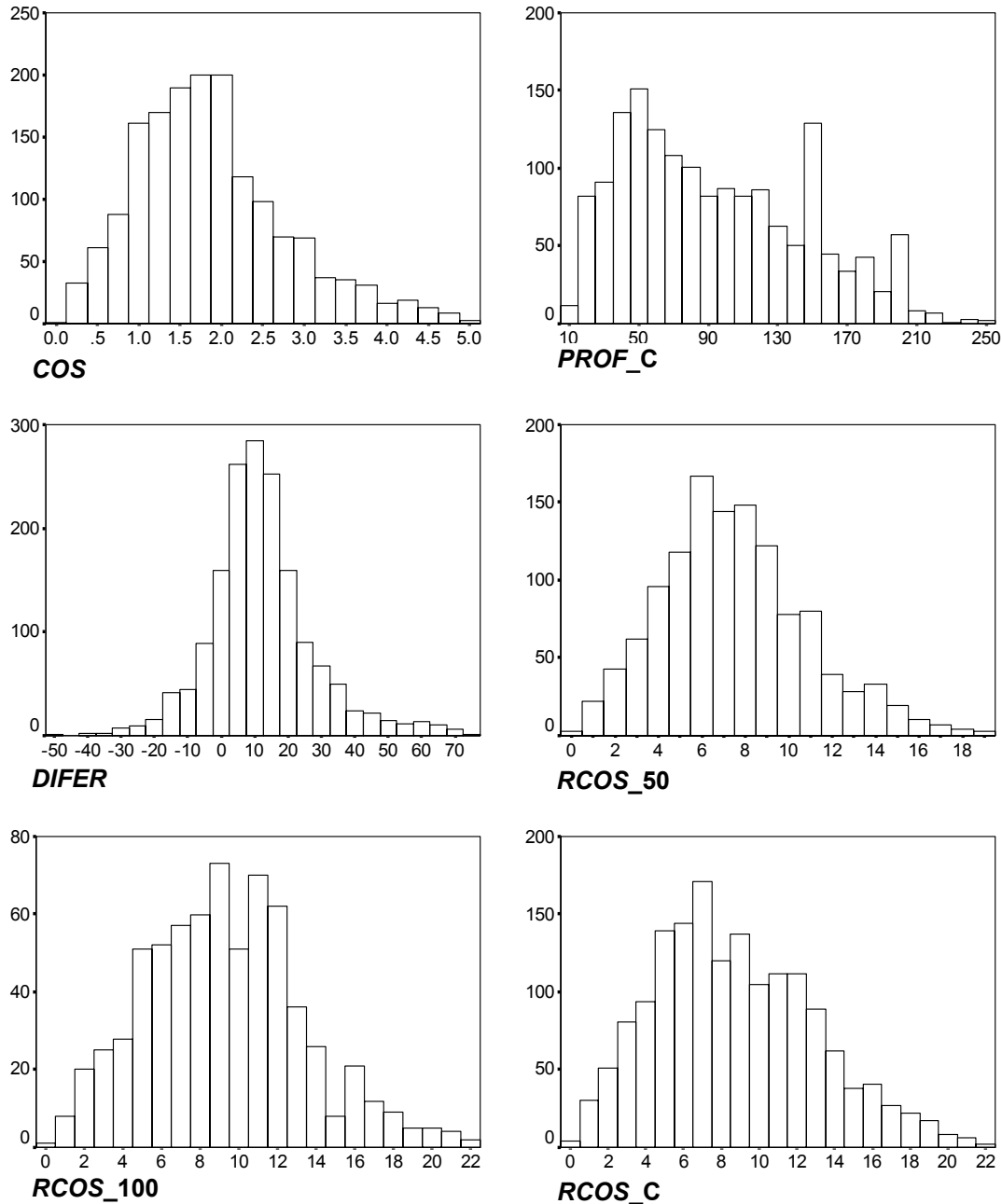


Figura 44. Histogramas de frecuencias de los valores de Carbono (**COS**, %), profundidad del perfil hasta el horizonte C (**Prof_C**, cm), diferencia en el ploteo con respecto a la curva patrón (**DIFER**, cm) y reservas de carbono calculadas para diferentes profundidades (**RCOS_n**, kg.m⁻²).

Tabla 21. Estadígrafos y significación de las diferencias entre Subtipos de suelos (STS) para el *COS* (%) y la *RCOS* hasta el horizonte C (*RCOS_C*. kg.m⁻²) calculada para los perfiles de suelos de Cuba (ver códigos en Anexo 2).

STS	N	COS (%)					Sig	STS	N	RCOS_C (kg.m ⁻²)					Sig
		M	SeM	S	Med	STS				N	M	SeM	S	Med	
10o	6	0.41	0.06	0.14	0.42	a	10o	6	3.30	0.76	1.87	2.86	a		
10a	6	0.53	0.09	0.21	0.45	a	09a	6	3.88	1.22	3.00	2.95	ab		
13a	6	1.01	0.29	0.71	0.83	a	03p	6	4.31	1.61	3.95	3.13	ab		
03p	5	1.20	0.31	0.69	0.86	a	10a	6	4.89	0.34	0.84	4.81	ab		
10h	5	0.91	0.04	0.09	0.90	a	01j	21	4.42	0.59	2.71	4.87	ab		
10l	28	0.96	0.12	0.61	1.00	a	09n	43	5.37	0.55	3.61	4.92	ab		
09n	43	1.24	0.09	0.61	1.07	a	10l	28	5.01	0.46	2.42	5.02	ab		
10q	6	1.09	0.19	0.48	1.18	a	08c	85	5.61	0.28	2.62	5.22	b		
09a	6	1.15	0.16	0.39	1.18	a	04h	5	6.65	1.56	3.50	5.61	bc		
11a	42	1.45	0.11	0.70	1.23	a	10h	5	6.20	0.25	0.56	6.45	bc		
03a	55	1.41	0.10	0.75	1.33	a	02j	65	7.31	0.42	3.37	6.78	c		
08c	85	1.36	0.07	0.61	1.38	a	03a	55	7.33	0.48	3.56	7.02	c		
08a	65	1.59	0.08	0.67	1.52	a	06e	189	7.62	0.26	3.61	7.14	c		
01j	21	1.83	0.25	1.13	1.53	b	04a	215	7.53	0.24	3.46	7.22	c		
02k	44	1.71	0.08	0.56	1.58	ac	10q	6	6.51	1.46	3.58	7.23	bc		
08b	91	1.69	0.07	0.66	1.62	a	07a	109	8.14	0.36	3.79	7.70	c		
05a	57	1.71	0.07	0.57	1.76	c	08a	65	8.69	0.40	3.25	8.01	c		
02m	48	1.78	0.08	0.55	1.77	c	02a	122	8.65	0.34	3.71	8.45	c		
01a	140	2.10	0.09	1.04	1.81	d	08b	90	9.43	0.43	4.06	8.94	cd		
02a	117	2.03	0.10	1.10	1.82	e	06d	55	8.81	0.54	3.97	9.08	cd		
04a	213	1.87	0.05	0.73	1.83	b	02k	44	9.82	0.42	2.81	9.52	de		
04h	5	2.13	0.41	0.91	1.85	f	04l	5	10.26	1.30	2.91	9.66	de		
06e	189	1.99	0.07	0.90	1.86	e	08u	10	10.70	1.11	3.52	9.78	de		
02j	64	2.08	0.11	0.85	1.96	e	04d	5	9.73	2.40	5.37	10.20	cde		
07a	105	2.18	0.09	0.88	1.99	f	11a	27	10.29	0.64	3.34	10.20	de		
06d	55	2.34	0.12	0.86	2.23	f	02m	48	10.38	0.48	3.31	10.24	de		
15a	9	2.15	0.34	1.01	2.24	d	08v	5	11.15	1.33	2.96	11.18	de		
04l	5	2.60	0.32	0.72	2.41	g	15a	8	10.44	1.59	4.50	11.53	de		
08t	7	2.41	0.35	0.93	2.48	g	12a	67	11.70	0.63	5.16	12.43	e		
12a	69	2.60	0.13	1.07	2.57	g	08t	7	12.58	1.21	3.21	13.14	e		
08u	11	3.26	0.29	0.96	3.24	g	05a	58	12.60	0.38	2.88	13.26	e		
08v	6	3.33	0.35	0.86	3.31	g	01a	143	13.64	0.33	3.95	13.46	e		
04d	5	3.68	0.28	0.63	3.71	h	15e	3	12.92	1.91	3.31	14.17	e		
15e	3	4.08	0.44	0.75	4.49	g	13a	-	-	-	-	-	-		
Total	1622	2.10	0.09	1.04	1.81		Total	1612	8.73	0.11	4.27	8.28			

STS - Subtipos de Suelos ordenados por su valor medio, M – media; SeM – error estándar de la media; S- Desviación estándar; Med – mediana; Sig - análisis de dos muestras independientes de Mann-Whitney para una prueba de dos colas con un nivel de significación $\alpha = 0.05$.

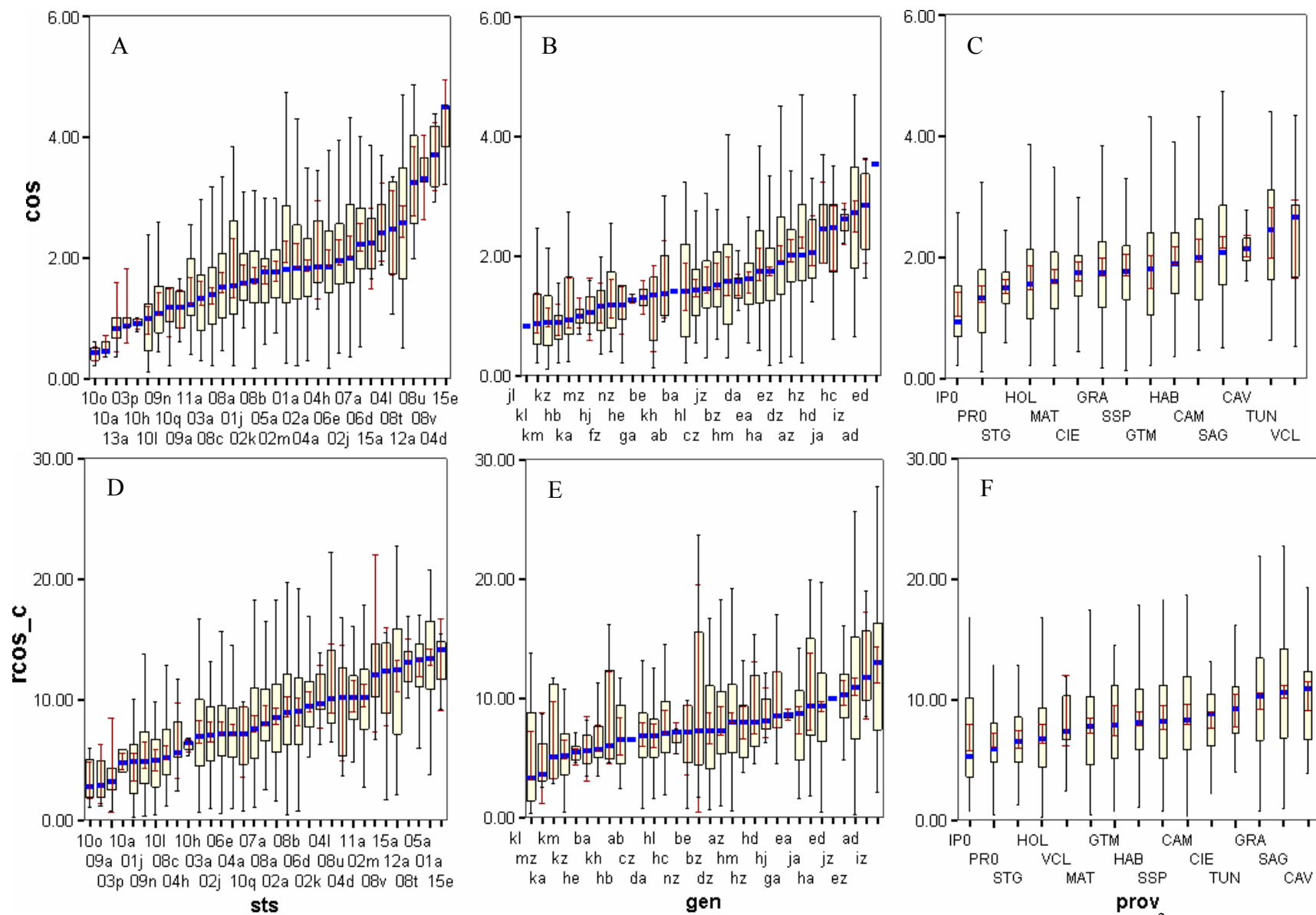


Figura 45. Variación de los valores de la mediana de Carbono (COS , %) y Reserva de Carbono ($RCOS_C$, $kg.m^{-2}$) por Subtipo de Suelo (*sts*), Género (*gen*) y Provincia (*prov*) (ver códigos en Anexo 2), barra de error igual a $M \pm 2SeM$.

3.4.3 El contenido de Carbono de los suelos de Cuba

La media de Carbono para el horizonte superficial de 1 622 perfiles de Cuba es menor de 2.00%, con un valor modal de 1.00% (Tabla 18), valores que pueden considerarse medios (Tabla 20) según los criterios de ISRIC¹⁸ para la evaluación de características de los perfiles de referencia (Brunt y Kauffman, 1995) y por otra parte, de acuerdo a las categorías manejadas por la antigua Dirección de Suelos y Fertilizantes del Ministerio de la Agricultura, estarían ubicados en el límite entre Bajo y Medio (DGSF, 1982). Del análisis de las frecuencias (Figura 44, CARB y Tabla 18) se deduce que la mayor parte de los valores están entre 1.00% – 2.00% de **COS**, con un predominio de los valores medios y altos (Tabla 20, Figura 45), esta última categoría con una media menor de 3.00%.

Los resultados confirman los resúmenes estadísticos por provincia publicados, en una larga serie de trabajos, (Ej.: Tremols *et al.*, 1985), que tienen como base los perfiles de suelo del mapa de series 1:50 000; en ellos se constata que nuestros suelos de manera global, tienen valores medios de MO (% de C×1.724) cercanos a 3%, con algunas diferencias provinciales; a pesar de ello, estos valores deben considerarse sobrestimados debido a las siguientes razones:

1. Los datos procesados son el reflejo del estado de los suelos de hace 20 – 25 años como promedio, época que se caracterizó por un excesivo empleo de la mecanización y el uso de químicos en la agricultura y que posteriormente, en la última década, sufrió un deterioro de la disciplina tecnológica en el manejo de los cultivos y en general de los suelos, provocando una disminución drástica en la producción de biomasa (rendimientos).
2. Los resultados también están sesgados por los valores de la población de perfiles utilizados para la construcción de las curvas patrones, los que como ya se sabe, son representativos de los suelos mejor conservados y por ende debe esperarse un aumento de los valores medios por este concepto.
3. La población analizada para la región oriental, está gravada por un número considerable de perfiles (N=382) provenientes del macizo Sagua – Baracoa (Figura 45C, SAG, media = 2.31, SeM = 0.049, moda = 1.86) los cuales difieren significativamente del resto de la población con una probabilidad P de 0.000 en una prueba de Mann - Whitney y que

¹⁸ International Soil Reference and Information Centre.

inevitablemente suben el promedio al predominar áreas de reservas ecológicas y áreas forestales, en relación a otros territorios.

El valor medio de carbono, suprimiendo solamente el efecto de la población de datos provenientes de Sagua – Baracoa, es de 1.77 (SeM = 0.025), equivalente a 3.05% de MO, si se suprimiera el sesgo aportado por las otras causas, el valor sería menor que 3.00%.

Sobre el primer punto es posible esperar un comportamiento diferenciado en el territorio nacional, por cuanto en algunas zonas del país con baja incidencia de mano de obra, extensas áreas de cultivo fueron colonizadas por la maleza durante la pasada década, fundamentalmente el marabú (*Caillica glomerata*, Lin.) lo que propicia una reconocida efectiva protección a los suelos (Roy, 1975), este es el caso de provincias como Ciego de Ávila, Camagüey y Tunas. Por el contrario, en sitios próximos a núcleos poblados, la escasez de combustible propició una mayor deforestación al utilizarse la madera como combustible doméstico.

Con todo lo anterior se quiere destacar que es necesaria la actualización paulatina de la información sobre los contenidos de materia orgánica de nuestros suelos, aun más en el contexto de los esfuerzos por desarrollar una agricultura orgánica.

3.4.3.1 Comparación para diferentes criterios de grupo

De acuerdo con una prueba de Kruskal Wallis para k muestras independientes, todas las variables consideradas (*COS*, *PROF_C*, *DIFER*, *RCOS_50*, *RCOS_100*, *RCOS_C*) difieren significativamente de manera global ($P = 0.000$), cuando se consideró el Subtipo de Suelo, el Género o la Provincia de procedencia de los perfiles, como variable de grupo.

Este último criterio fue solo válido para subrayar contrastes entre determinados suelos cuya distribución puede enmarcarse con un límite administrativo. Tal es el caso de los suelos de Pinar del Río y la Isla de la Juventud (Figura 45C) regiones donde predominan suelos derivados de rocas silíceas o depósitos cuarcíticos, rocas formadoras que no favorecen la acumulación de materia orgánica aún en presencia de una mayor humedad.

Al considerar las diferencias entre los Subtipos de Suelos de manera particular, tal como se realizó para las variables *COS* y *RCOS_C*, se pueden extraer conclusiones con relación a en qué suelos se favorece la acumulación de carbono. Esta comparación se llevó a cabo una vez ordenados por sus valores medianos, tal como se muestra en la Tabla 21. En la Figura 45, ya

citada, también se muestran las variaciones por Género y Provincia. Algunos resultados pueden estar influenciados por la diferencia de observaciones entre subtipos de suelos.

Obviando consideraciones de manejo y el uso específico de los suelos, de manera global el drenaje es uno de los factores que tiene mayor influencia en que determinados suelos pertenezcan a la misma población, lo que se constata por la manera en que se agrupan suelos gleyzados donde el horizonte gley alcance el horizonte superior (08a, Gley suave; 08b mediana y 08c fuertemente gleyizado; 04b, Pardo pseudogley), también la presencia de rocas carbonatadas juega un papel importante (06d, Calizo rojo: 07a, Calizo humificado), así como determinadas rocas formadoras como los depósitos silíceos.

Como era de esperar los suelos con más bajos tenores de carbono orgánico en el primer horizonte, son aquellos con condiciones desfavorables para el desarrollo del proceso de humificación, tales como los suelos arenosos, lateríticos (Mocarrero), salinos y los suelos en los que el proceso de gleyzación es intenso en la parte superior del perfil (08, Gley), estos resultados están acordes a los presentados por Kauffman *et al.* (1995).

Los suelos aluviales, también caen en el grupo anterior, pero en este caso no es por la existencia de condiciones desfavorables para la humificación, las posibles razones son:

1. Fueron los suelos más utilizados en la producción tabacalera y hortícola en la colonia.
2. Fueron los suelos escogidos por los agricultores neolíticos (Ortega, en prensa).
3. En los planos propensos a inundaciones pueden cubrirse con aluviones jóvenes provenientes de los suelos erosionados aceleradamente, como ocurrió en los aluviales de Granma con el ciclón Flora.

Los suelos que en condiciones inalteradas, por lo general presentan un horizonte A mullido, frecuentemente ocupan posiciones en paisajes con pendientes de diferentes grados, tales como los suelos 04 (Pardos Sialíticos), 06 (Fersialíticos) y 07 (Húmicos Sialíticos).

Amelung *et al.* (2002) demuestran que la materia orgánica se concentra en la superficie de los agregados de suelos con horizonte mólico (mullido) y este hecho ayuda a preservar la estructura, la excesiva mecanización altera el régimen de aireación de los suelos y con ello la mineralización acelerada de la materia orgánica, dejando al suelo aún más expuesto al desarrollo de los procesos erosivos. Incluso en muchos suelos ferralíticos este proceso ocurre, donde la erosión es del tipo laminar, que precisamente remueve el tamaño de partículas a la que predominantemente se asocia la materia orgánica (Roscoe *et al.*, 2001) y es acelerado por el manejo inadecuado como la quema

reiterada (Bird *et al.*, 2000). Es por ello, que para muchos subtipos de suelos en los que podía esperarse un contenido más alto de *COS*, no es así.

Entre los suelos de mayor contenido de Carbono en el primer horizonte, se encuentran los suelos de montaña que en la actualidad están bajo bosque; no obstante un cambio de uso en estos suelos que implique la eliminación del bosque, conlleva una pérdida acelerada de la MO, como se aprecia en los lugares deforestados.

Una visión espacial de la distribución de los perfiles y sus tenores de carbono en el primer horizonte (Figura 46), permite apreciar un predominio de los valores más altos en las regiones llanas centrales de Villa Clara y Camagüey, coincidente con lo hallado por Tremols (1987; 1988). La explicación de este comportamiento y de otros muchos de diferente carácter, tienen su respuesta en la historia de las condiciones climáticas que prevalecieron durante la formación de los suelos del archipiélago cubano.

Ya ha sido establecida la concordancia de períodos de aridez con el avance de los glaciales (Shanzer *et al.*, 1975; Ortega, 1983; Pajón *et al.*, 2001); sin embargo, aún en estas condiciones, en la evolución paleoclimática de Cuba, se ha demostrado el hecho de que las regiones centro orientales pudieron estar sometidas a un régimen más seco (Ortega y Arcia, 1982) lo cual condicionó el predominio de arcillas esmectíticas de neogénesis (Paneque, 1984) que forman complejos órgano - minerales más estables (Bisdorn *et al.*, 1982), los que debido al relieve más llano han tenido más oportunidad de conservación que aquellos formados en las zonas de igual naturaleza del occidente más húmedo. En el trabajo de Paneque (Ob. Cit.) se insinúa una evolución desde Chernoziom y Bruniziom hasta Vertisol en las llanuras desde Camagüey hasta Villa Clara.

Aunque en el momento a que se hace referencia no se reconoce una fase esteparia en la evolución de los suelos de estas regiones, imprescindible para la formación del Chernoziom y el Bruniziom, ya era aceptada tal posibilidad por algunos investigadores, entre los cuales se encontraba el científico francés Pierre Segalen, al advertir que muchos suelos no se correspondían con el clima (Ortega y Segalen, 1986). Ortega (1985) anticipó lo que hoy es ampliamente confirmado en el hemisferio por diversas disciplinas, estudios recientes a partir de registros palinológicos aseveran que las sabanas neotropicales se extendieron tanto al norte como al sur del ecuador durante el período pleniglacial (Behling y Hooghiemstra, 2001).