

UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO, DRENAJE Y CIENCIAS DEL SUELO

**LAS RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO DE
LOS SUELOS MINERALES DE CUBA. APORTE
METODOLÓGICO AL CÁLCULO Y
GENERALIZACIÓN ESPACIAL**

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

Autor: Daniel Ponce de León Lima
Tutor: Dr. Fernando Ortega Sastriques, Lic. Inv. Titular

La Habana
2003

AGRADECIMIENTOS

Antes del recuento y la para mi obligada y siempre incompleta lista de nombres que deseamos impresos a manera de insuficiente reconocimiento, quiero decir que esta Tesis, o quizás otra, era una deuda con muchos buenos compañeros y amigos que desde hace más de una década me conminaban a materializar, algunos que siguen acompañándonos y contribuyendo al desarrollo de la edafología cubana, como Rosa Orellana, Greco Cid, Julián Herrera, Teresa López, Felicita o Luis Gómez y otros que tomaron otro camino como Raúl y Ángel.

Mi primer pensamiento es entonces para la Universidad Agraria de La Habana, la Facultad de Agronomía y mis compañeros del Departamento de Riego, Drenaje y Ciencia del Suelo, ellos me abrieron las puertas y dieron todas las facilidades, lo cual permitió preparar el documento de Tesis, en un tiempo relativamente breve. Especialmente al MSc. Juan Pérez y el Dr. Nelson Martín, jefes del Departamento y la Disciplina, respectivamente, sin su directo apoyo no hubiese sido posible. Igualmente a los Doctores Enrique Frómata y Ramón Brunet y el MSc Heriberto Vargas.

Al Dr. Eduardo Héctor, vicedecano, por su paciencia y tino, a Asela Ramos que se encargó de la documentación, al Dr. Pablo Hernández, vicerrector, por el apoyo material y al entonces Decano Dr. Elio del Pozo por su confianza.

Al Grupo de Agrofísica, del cual también tengo la satisfacción de formar parte, e hicieron de este empeño algo propio. En deferente atención a la Dra. Maria Elena Ruiz, igualmente a la MSc. Mercedes Albelo, al Msc. Hanoi Medina y Eva Fleitas. Al amigo Jorge Díaz, las a veces prolongadas horas de discusiones sobre geoestadística y las muy fructíferas jornadas de procesamiento, acentúan el rigor de esta Tesis.

A los Doctores Adriano Cabrera y José Manuel Febles quienes realizaron un meritorio trabajo como oponentes en la etapa de predefensa, sus críticas, sugerencias y comentarios, resultado de una exhaustiva revisión, ayudaron de forma decisiva a restar incoherencias e imperfecciones. Igual consideración merece la Dra. Caridad Walkiria, quien prestó especial atención a la parte estadística y con cuyas observaciones me sentí obligado, en igual sentido agradezco a la MSc. Lucía Fernández, por sus consejos. A Lidia Angarica, el Dr. Eduardo Cuesta y Cersleyde Hernández por sus opiniones en materia económica. A Ángela Labrador por el tiempo dedicado a la lectura del material.

Al Consejo Científico de la Facultad de Agronomía y en especial al Dr. Nelson Garcés.

Al Dr. Gustavo Martín y todos los que tuvieron la gentileza de leer el material y expresar sus opiniones.

A mi pequeña familia, su apoyo espiritual fue decisivo, especialmente a mi hermana, única e inigualable Carmen Ponce de León, que actuó de verdadero mecenas. A Sandra Dorta por su personal apoyo y comprensión, por los días compartidos y por todo su cariño.

Al entrañable Carlos Balmaceda, con el que he colaborado en los últimos catorce años de valioso trabajo y del que se puede apreciar en cada acto su impronta de amigo, más que por todo su apoyo, inteligencia y sentido crítico, por el tremendo privilegio de contar con su amistad.

A mi también amigo José Carlos Núñez, siempre tendiendo la mano cuando se necesita, por su definitivo sostén cuando parecía que todo lo realizado se perdería.

A Eduardo Castro, con el que me siento en deuda por su oportuna ayuda. A Bárbara López por su auxilio y dedicación.

A mis profesores de mis días de estudiante universitario, especialmente a José Luis Durán y Rafael Ojeda, a Alberto Hernández con el que continúe mi formación ya como investigador en el Instituto de Suelos.

Honrar, honra, dijo Martí, y esa es la intención al referirme a mi Tutor Fernando Ortega Sastriques, paradigma de científico y portador de los más elevados valores éticos y humanos, quien enseña a trabajar con dedicación sin esperar recompensa. A él le debo gran parte de mi formación científica, en más de 15 años de colaboración, gracias a la desinteresada entrega de su enorme caudal de conocimientos. Su influencia comenzó desde los tiempos de estudiante a través de su literatura sobre múltiples aspectos de la ciencia del suelo. Fernando, más que Tutor, es maestro, certero crítico y por demás, amigo. Todo lo que de acertado y bueno tenga esta Tesis, ante todo, a él se debe.

Una Tesis de Doctorado significa una etapa, un tremendísimo esfuerzo personal; sin embargo, sin la ayuda en ocasiones altruista de las personas nombradas y otras que la ingrata memoria persiste en obviar, hubiera sido una tarea mucho más difícil de realizar, por ello, reciban todos mis más sinceros agradecimientos.

Daniel Ponce de León Lima.

A Aida y Nico por siempre presentes

A Oderay con todas mis esperanzas

SÍNTESIS

Ante la necesidad del conocimiento de la cuantía de las reservas de carbono orgánico de los suelos minerales de Cuba, se diseñó e implementó una metodología que atiende los dos aspectos esenciales: (1) la estimación puntual de la reserva de carbono orgánico (**RCOS**) a partir de la información de perfiles de suelos y (2) la generalización espacial de la reserva de carbono calculada.

Para el cálculo de la **RCOS** en los perfiles de suelos minerales de Cuba se utilizó un método de extrapolación matemática a partir del ajuste de funciones teóricas de distribución del carbono con la profundidad y curvas patrones de reserva de carbono por especie de suelo. La generalización espacial del cálculo de la reserva de carbono para toda Cuba se logró mediante un método de interpolación clasificatorio, utilizando la tecnología SIG, sobre la base del mapa de suelos y el mapa topográfico, ambos a escala 1:250 000, a una resolución de 1.25 minutos.

La metodología propuesta se validó y constituye un aporte nacional e internacional a la cuantificación de la reserva de carbono en los suelos minerales.

Las reservas actuales de carbono de los suelos minerales de Cuba, hasta el horizonte C, son de 729 Mt de carbono ($S_{RCOS} = 113$ Mt), con pérdidas de hasta 44% durante el periodo histórico (-3k años), relacionada con la deforestación y el mal manejo de las tierras, ocurridos principalmente en los últimos 250 años, a lo que se le añade los efectos del calentamiento global en la porción oriental del país.

Las pérdidas principales han ocurrido en la Cuenca del Cauto y otras llanuras con suelos hidromórficos y zonas alomadas de las provincias centrales y occidentales. Dichos sitios se valoran como los de mayor probabilidad de obtener una respuesta ecológica y económica ante la aplicación de políticas de preferencias en la consideración de cambios de uso de las tierras que maximicen el secuestro de carbono.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	- 1 -
CAPÍTULO 1 ANÁLISIS TEÓRICO METODOLÓGICO PARA EL CÁLCULO DE LA RESERVA DE CARBONO DE LOS SUELOS MINERALES	- 6 -
1.1 Definición y antecedentes en relación al carbono, los cambios globales y el uso de la tierra.....	- 6 -
1.1.1 El carbono orgánico del suelo	- 6 -
1.1.2 El carbono del suelo y los cambios globales	- 7 -
1.1.3 Factores edafogénicos que influyen en el proceso de humificación	- 9 -
1.1.4 Análisis del uso de la Tierra y su influencia en la degradación de la materia orgánica de los suelos de Cuba.....	- 11 -
1.2 Determinación de las Reservas de Carbono Orgánico en los Suelos	- 14 -
1.2.1 Antecedentes y principales metodologías.....	- 14 -
1.2.2 Valoración de la información edafológica en Cuba	- 15 -
1.2.2.1 Los mapas de suelos	- 16 -
1.2.2.2 La información de perfiles de suelo	- 18 -
1.2.3 Valoración de los errores asociados al cálculo de la <i>RCOS</i> en un perfil de suelo por el método tradicional.....	- 19 -
1.2.3.1 Profundidad (<i>h</i>).....	- 19 -
1.2.3.2 Carbono orgánico del suelo (<i>COS</i>).....	- 19 -
1.2.3.3 Densidad del suelo (<i>d_s</i>).....	- 20 -
1.2.3.4 Inclusiones (<i>I</i>).....	- 20 -
1.2.3.5 Resumen de los errores del método tradicional.....	- 21 -
1.2.4 Determinación de la <i>RCOS</i> a partir de modelos de distribución vertical de la materia orgánica en el suelo	- 22 -
1.2.4.1 Ajuste de Curvas.....	- 23 -
1.2.5 Generalización espacial. Nuevo paradigma en el tratamiento de la información edafológica	- 25 -
1.2.5.1 Métodos no geoestadísticos	- 27 -
1.2.5.2 Métodos Geoestadísticos	- 28 -

Tabla de Contenido

1.2.5.3	Predicción usando variables externas	- 29 -	
1.2.5.4	Incertidumbre de la estimación espacial	- 30 -	
1.2.6	Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	- 31 -	
1.2.6.1	Definición.....	- 32 -	
1.2.6.2	Modelos de representación del espacio geográfico.....	- 32 -	
1.2.6.3	Solución de problemas mediante el SIG	- 33 -	
1.2.6.4	Propagación de errores en el SIG.....	- 34 -	
1.2.7	Validación de la estimación puntual y espacial de la <i>RCOS</i>	- 37 -	
1.3	Potencial de los suelos para el secuestro de carbono, valoración económica- 37 -		
1.3.1	Valoración económica.....	- 38 -	
<i>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA RESERVA DE CARBONO</i>			
<i>ORGÁNICO DE LOS SUELOS MINERALES.....</i>			- 41 -
2.1	El objeto de estudio.....	- 41 -	
2.1.1	Método de Tiurin	- 41 -	
2.1.2	Método Walkley-Black	- 41 -	
2.1.3	Uso de información de <i>COS</i> en el cálculo de la <i>RCOS</i> sin atender al método analítico de laboratorio empleado	- 41 -	
2.2	Marco geográfico de la investigación	- 42 -	
2.3	Diseño de la metodología general de investigación.....	- 42 -	
2.3.1	Métodos Generales.....	- 42 -	
2.4	Metodología propuesta para la determinación puntual de la <i>RCOS</i>	- 43 -	
2.4.1	Información cartográfica utilizada y escalas de trabajo.....	- 44 -	
2.4.1.1	Procedimiento de digitalización.....	- 44 -	
2.4.1.2	Nomenclatura y Codificación	- 45 -	
2.4.2	Información de perfiles de suelos y bases de datos utilizadas	- 46 -	
2.4.2.1	Nomenclatura y Codificación	- 47 -	
2.4.2.2	Base de Datos región Cuba RCubPer	- 48 -	
2.4.2.3	Base de Datos para La Habana RCHabPer	- 50 -	
2.4.2.4	Base de Datos para la validación RCHabVal.....	- 51 -	
2.4.3	Obtención de las funciones teóricas y cálculo de la <i>RCOS</i> en los perfiles- 51 -		
2.4.3.1	Ajuste de curvas.....	- 51 -	

2.4.3.2	Generación de funciones teóricas.....	- 52 -
2.4.3.3	Procedimiento para la estimación puntual de la RCOS a partir del contenido de COS del horizonte superficial.....	- 52 -
2.4.4	Construcción de la Tabla General de Reservas	- 53 -
2.5	Metodología propuesta para la generalización espacial del cálculo de la reserva - 55 -	
2.5.1	Análisis exploratorio	- 55 -
2.5.2	Análisis Geoestadístico y selección del método de interpolación.....	- 55 -
2.5.3	Explicación del método clasificatorio (CLAS)	- 56 -
2.6	Generación del mapa de reserva del carbono -3k años	- 57 -
2.7	Análisis Matemático – Estadístico	- 57 -
2.7.1	Principales variables analizadas	- 57 -
2.7.2	Criterios de selección de los modelos matemáticos	- 58 -
2.7.3	Métodos estadísticos.....	- 58 -
2.7.3.1	Estadígrafos calculados	- 58 -
2.7.3.2	Prueba paramétrica	- 58 -
2.7.3.3	Pruebas no paramétricas	- 58 -
2.7.4	Métodos Geoestadísticos	- 59 -
2.7.4.1	Métodos de interpolación y condiciones del estudio.....	- 59 -
2.7.4.2	Estimación de la incertidumbre de la interpolación	- 60 -
2.7.5	Procedimiento de validación	- 60 -
2.7.5.1	Validación de la estimación puntual y espacial de la RCOS.....	- 60 -
2.7.5.2	Propagación de errores	- 61 -
2.8	Valoración económica	- 61 -
2.9	Software empleado	- 62 -
2.10	Unidades	- 62 -
<i>CAPÍTULO 3 VALIDACIÓN Y PRINCIPALES RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DETERMINACIÓN DE LA RESERVA DE CARBONO EN LOS SUELOS MINERALES DE CUBA.....</i>		
3.1	Aspectos generales	- 63 -

Tabla de Contenido

3.1.1	Justificación del uso de la Primera Clasificación Genética de los Suelos de Cuba -	63 -
3.1.1.1	La hidromorfía	- 63 -
3.1.1.2	La presencia de carbonatos	- 63 -
3.1.2	Análisis de correspondencia entre perfiles y suelos.....	- 64 -
3.2	Estimación puntual de la Reserva de Carbono Orgánico de los suelos ...	- 64 -
3.2.1	Análisis de las relaciones carbono (COS), densidad del suelo (d_s) e inclusiones (I - I) con la profundidad (h)	- 64 -
3.2.1.1	Relación COS/h	- 66 -
3.2.1.2	Relación d_s/h	- 68 -
3.2.1.3	Relación COS/d_s	- 69 -
3.2.1.4	Relación $(1-I)/h$	- 71 -
3.2.2	Análisis de los errores introducidos por el uso de funciones de distribución vertical con relación al método tradicional	- 72 -
3.2.2.1	Calidad de ajuste y comportamiento de los residuos con la profundidad	- 73 -
3.2.3	Ajuste de funciones teóricas	- 76 -
3.2.4	Validación del procedimiento de estimación puntual	- 77 -
3.2.4.1	Influencia de las inclusiones	- 77 -
3.3	Generalización espacial de la reserva de carbono orgánico de los suelos-	78 -
3.3.1	Análisis de la variabilidad espacial.....	- 78 -
3.3.1.1	Variabilidad espacial del COS y la $RCOS$ en la región Cuba	- 78 -
3.3.1.2	Variabilidad espacial de la $RCOS$ en la región Habana	- 79 -
3.3.2	Selección, comparación y validación de métodos de interpolación.....	- 80 -
3.3.2.1	Incertidumbre de la estimación	- 81 -
3.3.2.2	Validación del método clasificatorio	- 82 -
3.3.3	Cálculo espacial de la $RCOS$ para Cuba. Aplicación del método clasificatorio	-
	83 -	
3.3.3.1	Asignación de valores medios de reserva a cada especie de suelo	- 83 -
3.4	Principales resultados del análisis del contenido y la reserva de carbono de los suelos minerales de Cuba.....	- 85 -
3.4.1	Las variables analizadas.....	- 85 -

3.4.2	La profundidad de los suelos	- 86 -
3.4.3	El contenido de Carbono de los suelos de Cuba.....	- 87 -
3.4.3.1	Comparación para diferentes criterios de grupo.....	- 88 -
3.4.4	Comportamiento espacial de la distribución de la Reserva de Carbono de los Suelos minerales de Cuba.....	- 91 -
3.5	Pérdidas del Carbono durante el período histórico (-3k años)	- 93 -
3.6	Valoración económica de las áreas con potencial para el secuestro de carbono y el establecimiento de políticas de preferencias	- 95 -
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		- 97 -
	Conclusiones.....	- 97 -
	Recomendaciones	- 99 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		105
ANEXOS	123	

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO) de los suelos participa muy activamente en la fertilidad de los mismos, a pesar de su relativo bajo contenido e influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de variados mecanismos (Kononova, 1981; Ortega, 1987).

Desde el comienzo de la agricultura en Cuba, se han aplicado prácticas poco conservativas con efectos secundarios adversos, uno de los cuales ha sido la disminución de las reservas de MO de los suelos. Tales prácticas van desde la incipiente deforestación, la práctica del encalado, aplicado no con el ánimo de enmendar la reacción de suelos ácidos, sino de acelerar la descomposición del humus con el objetivo de liberar nitrógeno para nutrir a las plantaciones de café y caña de azúcar (Vigil y Ortega, 2000), hasta el excesivo laboreo.

La Reserva de Carbono Orgánico de los Suelos (**RCOS**), es un indicador de la calidad y estado de conservación de los suelos (Kononova, 1981; Carter, 2002) y su conocimiento es importante en la Toma de Decisiones con fines de planificación de un territorio; sin embargo, no existen antecedentes de determinación de la reserva de carbono para la totalidad del territorio nacional ajenos al presente estudio, habiéndose realizado este cálculo sólo para perfiles aislados, completamente caracterizados y estimaciones globales en reservas ecológicas, como la de Sierra del Rosario (Suárez, 1999).

Cuantificar las reservas de carbono ha surgido además como una necesidad en el contexto del cambio climático y sus implicaciones políticas. Es necesario perfeccionar la información que permita una mejor realización de los cálculos globales de las reservas y de los flujos de carbono entre los distintos reservorios (*pools*) ya que en especial, es inadecuada la información sobre el contenido de carbono en los ecosistemas terrestres (Hibbard *et al.*, 2002). Este hecho fue utilizado por la administración reaccionaria de Bush hijo, para retirarse del convenio de Kyoto, que compromete a las partes a reducir las emanaciones de gases invernadero.

El GCP (*Global Carbon Project*) tiene como meta trazar una imagen completa del ciclo del carbono global, para ello uno de los aspectos a los cuales deben determinar y dar explicación, es a los patrones y variabilidad de los principales reservorios en cuanto a su distribución espacial y temporal (Hibbard *et al.*, 2002).

Si bien es importante el conocimiento de los escenarios históricos para intentar explicar la dinámica de los procesos, más importante es tratar de conocer hacia dónde estos se dirigen, de

Introducción

manera de poder anticiparnos a los cambios, aprovechando mejor el medio, o mitigando las consecuencias negativas con la toma de decisiones que contrarresten esos efectos. La extrapolación al futuro se logra con el uso de modelos matemáticos de los procesos.

La FAO¹ favorece el desarrollo, perfeccionamiento y aplicación de modelos holísticos de predicción en los cuales se encuentra, como un punto vital, el secuestro o emisión de carbono por los diferentes ecosistemas, incluyendo los agroecosistemas (Ponce-Hernández, 1999), donde un componente importante es la simulación del balance de masas del ciclo del carbono, para lo cual se usan modelos establecidos como Century (Parton *et al.*, 1987) y Roth-C (Coleman y Jenkinson, 1995), por citar dos ejemplos.

La reserva de carbono es una variable fundamental en la aplicación exitosa de esos modelos y sus resultados dependen en gran medida de la calidad de la información de que se dispone (Burrough y McDonnell, 1998), además de ser sensibles a la escala del estudio.

El conocimiento lo más detallado posible de la distribución espacial de las reservas de carbono es vital para lograr inferencias adecuadas en los escenarios modelados, escoger los puntos bases de monitoreo y analizar la adecuación de los modelos con la realidad, además de contar con la cuantificación real de este importante recurso, para fines de la planificación, tal como es importante conocer las reservas forestales, minerales, y otros.

Sobre esta base, es posible dar elementos para la selección de los sitios más promisorios, desde el punto de vista ecológico – económico, para el establecimiento de bosques u otros tipos de usos de la tierra que maximicen el secuestro de carbono.

Existen herramientas que integradas permiten lograr este propósito, el cálculo aplicado, los Sistemas de Información Geográfica, la Geoestadística y muy importante; los principios y regularidades que rigen la génesis y formación de los suelos en general y los procesos de humificación – mineralización en particular, en su contexto histórico natural, matizado por la acción del hombre como fuerza transformadora.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pertenecientes a las tecnologías de la información (Burrough y McDonnell, 1998), permiten mediante el almacenamiento, manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos georreferenciados, la solución de problemas complejos de planificación y gestión; así como, la modelación de escenarios. La geoestadística por su parte, basada en la teoría de las variables regionalizadas (Journel y Huijbregts, 1978), reúne una

¹ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

colección de herramientas estadísticas y determinísticas que permiten comprender y modelar la variabilidad espacial de propiedades distribuidas en el espacio (Deutsch y Journel, 1998), así como su estimación, proveyendo además la posibilidad de conocer el error de dicha estimación (Goovaerts, 2001).

La fuente de información para el cálculo de la reserva de carbono en los suelos es la información edafológica, el método utilizado para el cálculo de la reserva de carbono en un perfil consiste en la simple suma de la reserva calculada en cada horizonte particular, pertenecientes a perfiles de suelos caracterizados exhaustivamente por las variables implicadas en todos sus horizontes, en la que se tiene en cuenta además del contenido de carbono, la densidad del suelo y el contenido de inclusiones, método habitual en la práctica edafológica para el cálculo de las reservas de nutrientes. Sin embargo, la información edafológica contenida en los mapas de suelos desde el punto de vista del cálculo de la reserva, se caracteriza por ser escasa e incompleta y de difícil obtención por sus costos, lo que ha motivado que aún no se cuente con una estimación de las reservas de carbono de los suelos en Cuba y gran parte del mundo.

La metodología más ampliamente difundida para el cálculo de la reserva de carbono en los suelos minerales consiste en calcular la reserva en perfiles de suelos representativos completamente caracterizados y luego multiplicando el valor obtenido en el perfil por el área que ocupa en un mapa de suelo, sin tener en cuenta la variabilidad espacial de la reserva, la asociación entre los perfiles y el mapa de suelo se logra mediante el empleo de algún software de Sistema de Información Geográfica, tal como fue realizado por Kimble *et al.* (1990), para el cálculo de la reserva global de carbono.

Bernoux *et al.* (1998) usaron un modelo de distribución vertical del carbono con fines de estimar su contenido en horizontes no medidos y funciones de pedotransferencia para la estimación de los valores de densidad del suelo, así como que aplicaron técnicas geoestadísticas para el estudio de la variabilidad espacial de variables y parámetros; no obstante, prevalecen las estimaciones a partir de perfiles completamente caracterizados que forman parte de bases de datos globales, realizadas a escalas muy pequeñas de 1:5M (Eswaran *et al.*, 1993) hasta 1:1M (Bernoux *et al.*, 2002).

Ante toda la situación descrita, se reafirma la necesidad de obtener una respuesta al problema científico planteado, de cómo determinar la reserva de carbono de los suelos minerales, a partir de la escasa e incompleta información edafológica disponible, en sus dos problemáticas

Introducción

esenciales, (1) la estimación puntual a partir de la información de los perfiles de suelos y (2) la generalización espacial de la reserva calculada, considerando los puntos de vista científico, tecnológico y ambiental.

Por lo anteriormente expuesto, se propone la siguiente **hipótesis de trabajo**:

La cuantificación de las reservas de carbono de los suelos minerales a partir de la información edafológica disponible, dentro de un margen de error intrínseco a las variables implicadas, es posible, empleando una nueva forma de cálculo que integre procedimientos matemáticos de estimación puntual y espacial a partir del conocimiento de los suelos y el empleo de tecnologías de información geográfica.

El **OBJETIVO GENERAL** de este trabajo es entonces:

Generar y validar una metodología que permita la determinación de las reservas de carbono de los suelos minerales de Cuba a partir de la información edafológica disponible, integrando procedimientos matemáticos de estimación puntual y espacial, a partir del conocimiento de los suelos y el empleo de tecnologías de información geográfica.

Objetivos específicos

1. Establecer y validar un método de extrapolación matemática basado en modelos de distribución vertical del carbono en los suelos, para la estimación puntual de la reserva de carbono en suelos minerales, a partir de la información disponible de perfiles de suelos.
2. Establecer y validar métodos globales y geoestadísticos de estimación espacial de valores de la reserva de carbono en sitios no medidos de acuerdo a la disponibilidad de información, así como considerar al suelo como variable externa para mejorar los resultados de la predicción espacial.
3. Cuantificar las reservas de carbono para los diferentes tipos de suelos y estimar las pérdidas de la reserva de carbono durante el período histórico, señalando dónde éstas han sido más importantes, así como, proponer los sitios más promisorios con mayor probabilidad de respuesta ecológica – económica para el establecimiento de políticas de preferencia en los territorios más afectados.

El cumplimiento de estos objetivos constituyen los **Aportes** de esta Tesis.

Desde el punto de vista científico, se proponen y validan procedimientos metodológicos que permiten la cuantificación de la reserva de carbono orgánico en los suelos minerales a partir de la información edafológica disponible, así como que por primera vez se cuantifican las reservas de carbono de los suelos minerales de Cuba, lo que constituye un aporte al conocimiento del papel de los ecosistemas terrestres en el balance del carbono; brindando además, una valoración de las pérdidas históricas de dicha reserva y un conocimiento más profundo de los suelos.

Desde el punto de vista tecnológico, integra tecnologías de avanzada y provee una plataforma de soporte a la Toma de Decisiones de Planificación basada en un Sistema de Información Espacial de la reserva de carbono orgánico de los suelos minerales de Cuba.

Desde el punto de vista ambiental, da respuesta al Programa Nacional de cambios globales y la evolución del medio ambiente cubano. Da una visión del estado de conservación de los suelos, desde la perspectiva del carbono, lo cual es un elemento de suma importancia para la evaluación del recurso y sienta las bases para la simulación de diferentes escenarios de cambio de uso de las tierras y los efectos del cambio climático. Se brinda una selección de los sitios de mayor probabilidad de respuesta ecológica – económica para cambios de uso de la tierra que maximicen el secuestro de carbono.

La conjugación de los aspectos anteriores, da la posibilidad de contar con los fundamentos científicos, técnicos y ambientales para la planificación estratégica del uso de la tierra por los organismos nacionales, desde el punto de vista del carbono del suelo.

CAPÍTULO 1 ANÁLISIS TEÓRICO METODOLÓGICO PARA EL CÁLCULO DE LA RESERVA DE CARBONO DE LOS SUELOS MINERALES

1.1 Definición y antecedentes en relación al carbono, los cambios globales y el uso de la tierra

1.1.1 El carbono orgánico del suelo

El carbono está presente en los suelos en cuatro formas fundamentales (Tiurin, 1937a):

1. Formas inorgánicas, formando carbonatos minerales.
2. Formas cercanas al carbono elemental, fundamentalmente grafito.
3. Materia orgánica fresca, compuesta por restos de animales y plantas poco alterados incluyendo a la biomasa microbiana, e incluso a huminas microbianas y heredadas, que se caracterizan por un tiempo de reciclaje (*turnover*) rápido.
4. Ácidos húmicos y fúlvicos extraíbles y diferentes tipos de huminas (Duchaufour, 1984).

Dentro de las formas orgánicas se incluyen los tres últimos, las formas condensadas son escasamente extraídas por los métodos tradicionales de determinación, pero por su escasa cuantía, es despreciable. La materia orgánica fresca grosera, aportada principalmente por la hojarasca, restos de cosecha, raíces y otras fuentes, se separa para el análisis, y se estima por otros métodos (Borhidi y Herrera, 1988).

El carbono orgánico del suelo (en lo adelante ***COS***), expresado también como materia orgánica del suelo² (MO), se determina habitualmente por métodos analíticos de laboratorio. Entre los métodos más frecuentes se encuentra la combustión seca, más exacta pero engorrosa para análisis de rutina a grandes volúmenes de muestras, y métodos de combustión húmeda más económicos; expresándose en % o preferentemente en términos de masa por área (kg.m^{-2} C; Soil Survey Staff, 1960), dadas las diferentes densidades de los suelos y que constituye la reserva de carbono orgánico del suelo (***RCOS***).

² En la literatura especializada en idioma inglés aparece con las siglas SOC (Soil Organic Carbon) o SOM (Soil Organic Matter).

En modelos de simulación como el Century (Parton *et al.*, 1987), la materia orgánica del suelo se divide en función del tiempo de reciclaje (*turnover*), en pasiva (0.5-1k años), lenta (10-100 años) y activa (semanas-1 año), partiendo del contenido expresado por los análisis de laboratorios habituales.

Con relación a los carbonatos en los suelos, estos se asocian no solo a aquellos heredados del material de origen sino a formas secundarias de mayor actividad (a excepción de nódulos cristalizados de poca solubilidad), y se presentan en forma de concreciones, pseudo micelios y manchas. Su formación presupone una disolución previa de una fuente carbonatada y su posterior precipitación en un régimen evaporítico, típico de las condiciones semidesérticas o desérticas, en el que la evaporación predomina sobre las precipitaciones, o en condiciones alcalinas en dependencia de la presión parcial de CO₂ gaseoso.

La cuantía total actual de carbono en carbonatos secundarios y otras formas de carbonatos en los suelos a nivel global, se estima en 700 Gt C (Batjes, 1996), asociados fundamentalmente a zonas áridas y semiáridas. Las condiciones climáticas actuales de Cuba, a excepción de localizaciones específicas, no favorecen la acumulación de los carbonatos secundarios, por lo que sólo pudieron formarse en un clima más seco que el actual (Ortega y Arcia, 1982), conservándose gracias a un régimen de escaso lavado.

1.1.2 El carbono del suelo y los cambios globales

*“... nuestra especie por primera vez corre el real peligro de extinguirse, por las locuras de los propios seres humanos, víctimas de semejante civilización”.*³

El problema del calentamiento global del Planeta como consecuencia de la acumulación creciente en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero es uno de los graves peligros que enfrenta la humanidad. El CO₂ es uno de los principales gases con efecto invernadero, su contenido se ha incrementado desde la revolución industrial en una magnitud sin precedentes en más de 400 k años (Raynaud *et al.*, 2003).

Los suelos del mundo constituyen uno de los cinco reservorios de carbono más importantes, según datos de Pedersen *et al.* (2003), se estima que el carbono orgánico del suelo alcanza 1 580

³ Palabras pronunciadas por Fidel Castro Ruz en la sección inaugural de la XIII Conferencia de Países No Alineados, efectuada en Kuala Lumpur, Malasia, el 25 de Febrero de 2003. Tomadas de la transmisión.

Gt C, que constituye el 3.3% del total global, de alrededor de 47 000 Gt (los océanos almacenan la mayor parte, 39 820 Gt C). Esta cantidad sumada a los 950 Gt de carbono inorgánico, es 3.3 veces lo que existe en la atmósfera (760 Gt C) y 4 veces lo que almacena la biomasa terrestre (610 Gt C), según Lal (1999).

Las cifras pueden variar según el criterio que sigan los diferentes autores, de acuerdo a la compilación hecha por Jonathan Adams¹, en la Figura 1 se muestra el diagrama de Keeling (1982), con valores de reserva actualizados de Pedersen *et al.* (2003).

Se considera que ese carbón está siendo liberado por el cambio de uso de las tierras en una tasa anual de 1.6 ± 1.0 Gt C (Kasting, 1998), cifra no despreciable si se compara con lo aportado por la quema de combustibles fósiles (5.5 ± 0.5 Gt C). La deforestación y el constante laboreo siguen siendo las principales fuentes de emisión de CO₂ (Leemans, 1999). El mismo autor estima, que desde la década del 50 del pasado siglo, el 75 al 80% del incremento del carbono en la atmósfera se debe a la deforestación y los cambios en el uso de las tierras.

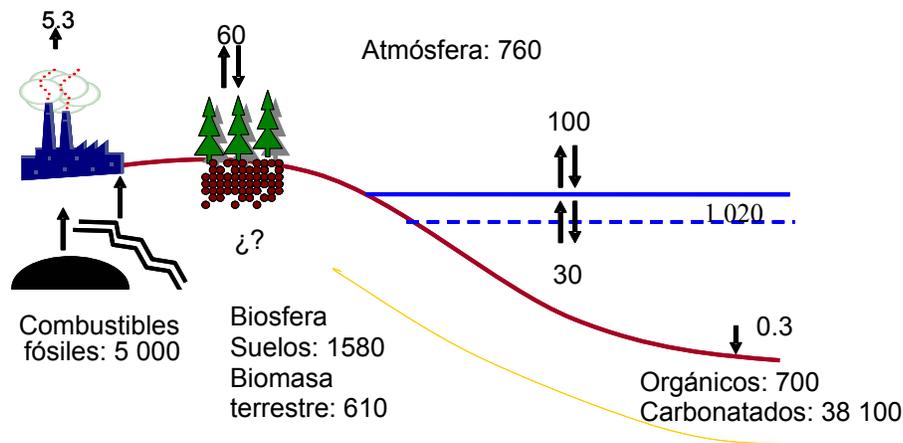


Figura 1. Principales reservorios de C en Gt y flujos Gt C/año (modificado de Keeling, 1982).

Según el IPCC (2001) la proyección del aumento de la temperatura debido al ritmo de incremento de los gases de invernadero en la atmósfera es de 1.4 a 5.8 °C al final de este siglo, lo que provocará un cambio climático en amplitud y dirección regional sin precedentes. Los efectos de la elevación del nivel del mar para los países costeros, debido al derretimiento de los hielos por el calentamiento global y la desaparición de especies, por la misma causa, son conocidos.

¹ <http://www.esd.ornl.gov/projects/qen/pool.htm>

La pérdida total de especies puede resultar de la inadaptabilidad al deterioro de las condiciones ambientales o de la imposibilidad de emigrar, ya sea por la pérdida de la continuidad espacial o temporal en esas condiciones (Overpeck *et al.*, 2003). No obstante, las condiciones climáticas por sí solas no explican el grado y rango de la biodiversidad actual, que tiende a la persistencia (Alverson, 2002), en estas circunstancias el cambio climático brusco tiene serias consecuencias. Overpeck *et al.* (2003) predicen la pérdida de biodiversidad a consecuencia del amplio desequilibrio entre la biosfera terrestre y el clima.

A pesar de las múltiples realidades, existen tesis que niegan o ponen en duda el papel de los gases invernadero en el calentamiento global (Idso, 1991; Kempf, 1992; Lenoir, 1992; Rasool, 1992; Postel-Vinay, 1986), tales argumentos han servido de justificación para la salida de la Casa Blanca del Protocolo de Kyoto. Dichas tesis se basan en las lagunas que existen en relación con el ciclo y balance del carbono a nivel planetario, ya que no está debidamente probado que el aumento de la concentración del CO₂ en la atmósfera sea la causa del calentamiento general del Planeta, y de que las variaciones del tiempo que se constatan están incluidas en la variabilidad natural del clima.

Sin embargo, las evidencias más actuales confirman una estrecha correspondencia entre el aumento de las emisiones y de la temperatura (Bradley *et al.*, 2003; Labeyrie *et al.*, 2003).

1.1.3 Factores edafogénicos que influyen en el proceso de humificación

Todos los factores edafogénicos influyen de una u otra manera en la cantidad y calidad del humus que se acumula en los suelos (Duchaufour, 1970; Ortega, 1987).

El contenido de humus se encuentra en equilibrio dinámico con el medio. Su magnitud es la resultante de dos procesos antagónicos: el proceso de humificación y el proceso de mineralización del humus. El equilibrio entre ambos está regido por la ley de acción de masas y es relativamente sencillo de simular matemáticamente (Laudelot *et al.*, 1960). Todo factor que acelere o retarde a alguno de esos procesos desplazará el estado de equilibrio hacia contenidos mayores o menores de humus.

Los procesos de humificación se realizan tanto a través de reacciones bióticas como abióticas. Casi todas las reacciones abióticas se aceleran con el aumento de la temperatura unas dos veces por grado de aumento, mientras que las bióticas lo hacen hasta diez veces por grado (Liuzhin,

1968; Meyer y Ishiwatari, 1993), en los rangos normales existentes en los suelos. La mineralización del humus es solamente dependiente de la acción microbiana, por lo que el aumento de la temperatura favorece más a la destrucción que a la síntesis de humus (Panikov, 1990; Kasting, 1998).

El tipo de vegetación actúa directamente sobre los contenidos de materia orgánica de los suelos, ya sea por el monto de restos vegetales que aporta anualmente o por la calidad de estos. Cualquier factor que favorezca el crecimiento más vigoroso de las plantas permitirá una acumulación mayor de materia orgánica en los suelos, lo cual ha sido comprobado tanto en países de clima templado, como tropicales, así mismo en Cuba (Albareda y Velasco, 1965; Chertov, 1974; Rodríguez *et al.*, 1986).

En este sentido, la capacidad de los suelos de retener la humedad favorece la humificación, además de reducir la velocidad de mineralización del humus (Jambu, 1968), pero un exceso de humedad produce anaerobiosis prolongada y hace menos eficientes los procesos de humificación (Cizek, 1967; Ajtirtsev y Samoliova, 1983).

La formación de las macromoléculas de humus más estables se favorece en presencia de cationes solubles en la solución edáfica, como el Ca^{2+} , el Mg^{2+} , el Fe^{3+} y el Al^{3+} , capaces de insolubilizar y precipitar los precursores húmicos (Duchaufour, 1984), y ayudar en la condensación de esas moléculas. En las condiciones del trópico, el calcio es el catión más favorable (Jambu, 1968; Duchaufour, 1973; Buckert *et al.*, 1988), aunque ese papel puede ser jugado por los otros cationes en otros tipos de suelos (Duchaufour, 1984; Waby y Semoilova, 1986). Por el contrario, los cationes alcalinos tienden a dispersar las moléculas orgánicas y a peptizar los coloides, por lo cual inhiben los procesos de humificación, por esa causa los suelos salinos contienen poco humus (Jacquin *et al.*, 1979).

La estabilidad de las macromoléculas se incrementa si se unen íntimamente con la fase mineral del suelo, es por eso que el humus de los suelos pobres en arcillas no suele ser muy estable (Rabochev y Pyagai, 1989), mientras que en los suelos arcillosos se forman compuestos argilo – húmicos muy estables (Tiurin y Gutkina, 1940). No todas las arcillas tienen la misma capacidad de formar compuestos argilo – húmicos, estos se formarán más fácilmente mientras mayor sea la superficie específica de las arcillas, por eso las esmectitas son más favorables en el proceso de humificación que las caolinitas (Laura, 1975).

Tanto los coloides minerales como orgánicos de la mayor parte de los suelos son acidoides, por lo que se repelen. Para que se puedan unir los coloides entre sí, para formar unidades estructurales más complejas, es necesario que se venzan esas fuerzas de repulsión. En los suelos esto ocurre cuando disminuye el contenido de agua en el mismo. La reducción de la capa de hidratación de los coloides disminuye su ionización y por tanto su carga eléctrica, al mismo tiempo que permite que se ponga en contacto con otros coloides tanto orgánicos como minerales. En esas circunstancias, es posible la aparición de enlaces de hidrógeno entre las micelas (Jan, 1969; Brickert, 1979). Esta es la causa de que los complejos argilohúmicos más estables son propios de los suelos de los climas con temporadas de humedad contrastantes, mientras que en los climas marinos estos complejos son más sencillos.

El hombre influye directamente en el proceso de humificación al cambiar la vegetación natural de los suelos, o al dedicarlos a cultivos anuales que dejan pocos residuos en los campos. También influye en los regímenes hídrico, térmico, gaseoso, y salino de los suelos al emplear el riego, laborarlos intensamente, fertilizarlos, encalarlos y drenarlos, entre otras prácticas. Morales *et al.* (2001) establecen una dependencia general entre diferentes suelos y la vegetación en cuanto al contenido de carbono en Cuba, tal que: bajo bosque > bajo pastizal > bajo caña de azúcar > bajo cultivos intensivos.

En resumen se puede decir que la humificación de un suelo obedece a los factores edafogénicos fundamentales: el clima, del cual depende la vegetación y el régimen hidrotérmico; el contenido de bases, relacionado con el pH; la cantidad y calidad de las arcillas; la salinidad y el uso del suelo.

1.1.4 Análisis del uso de la Tierra y su influencia en la degradación de la materia orgánica de los suelos de Cuba

La agricultura intensiva en Cuba, tiene menos de 250 años, tomando como fecha de partida la expansión del cultivo del café y de la caña de azúcar.

Nuestros aborígenes más avanzados (grupos agro alfareros), desarrollaron una agricultura neolítica poco destructiva, dado que empero de practicar un sistema del tipo roza, tumba y quema, abandonaban los conucos a los dos o tres años por causa de las malezas y no por el agotamiento de la fertilidad (Guarch, 1986), con indicios de haber desarrollado sus actividades preferentemente en suelos Húmicos Sialíticos e Hidromórficos (Jaimez y Hernández, 1994), en

alturas entre 90 y 150 m (Guarch, 1986) donde los procesos erosivos debieron tener una pobre manifestación. Esta agricultura fue más bien intensiva, pero en pequeñas áreas (<2%, Borhidi, 1991), incluso Ortega (2002) plantea la existencia de sistemas de regadío en la Cuba precolombina. El sistema de cultivo de los aborígenes incluía la incorporación de cuanto desecho orgánico estuviera disponible y la recuperación del bosque, similar a la práctica de los indios amazónicos en cuyos asentamientos aparecen suelos humificados de origen antrópico (Pabst, 1991).

El café se comenzó a plantar en la segunda mitad del siglo XVIII⁵, en las zonas llanas de occidente, sin sombra (Gutiérrez, 1992), lo que presupone el desbroce y quema de la vegetación original, luego por la decadencia que sufrió debido al fin del tráfico negrero (Martínez, 1957) y el calentamiento del país en el fin de la Pequeña Edad Glacial (Vigil y Ortega, 2000) se desplazó a la montaña sin abandonar tan dañina práctica, lo que originó la conocida frase de Engels aparecida en “El papel del trabajo en la transformación del mono en hombre” (Engels, 1876) “... *los plantadores españoles quemaban los bosques para obtener en la ceniza un abono que sólo les alcanzaba para fertilizar una generación de cafetos...*”.

El encalado fue otra de las prácticas excesivas durante la colonia, tanto en el cultivo del café (Martínez, 1957; Vigil y Ortega, 2000) como de la caña de azúcar, pues no se hacía para corregir la acidez del suelo, si no para liberar nitrógeno por la vía de la mineralización de la materia orgánica, para lo cual se utilizaba $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que tiene un poder mucho más destructor. Así se observa a Pérez de la Riva recomendando el encalado del café (Martínez, 1957), planta reconocida como acidófila y Álvaro Reynoso hacía la misma recomendación para el cultivo de la caña de azúcar, aún en la década de los 70 del pasado siglo XX, la Dirección General de Suelos y Fertilizantes abogaba por lograr la introducción del encalado masivo en los suelos de Cuba, en una agricultura que apuntaba a uno de los índices más altos de mecanización en el mundo.

Estas y otras prácticas dieron origen a una agricultura que siempre se caracterizó por los bajos rendimientos, tal como se señala en el prólogo al libro insigne de Alvaro Reynoso dedicado al cultivo de la caña de azúcar (Reynoso, 1862).

La influencia antropogénica se manifestó de manera más acelerada por el modo en que tuvo lugar la distribución de las tierras en la Cuba colonial, lo cual dio origen a las primeras sabanas

⁵ El café se introdujo en 1769 de acuerdo con el “Diccionario Geográfico, estadístico e histórico de la Isla de Cuba” de Jacobo de la Pazuela de 1863.

antrópicas actuales (Herrera, 1980) predominantes en las regiones llanas de Cuba, a diferencia de aquellas que Bennett y Allison (1928) y Bennett (1932) designaban como “*sabanas edáficas*” en las cuales el término se le aplicaba por igual al suelo y la vegetación, y que fuera criticado por Borhidi y Herrera (1977). Por otra parte, es conocido el papel que juega la quema y el laboreo en la disminución de las reservas de carbono de los suelos en nuestras condiciones (Agafonov *et al.*, 1973; Frómeta, 1983; de León *et al.*, 2001). En estudios con isótopos estables, (Bernoux *et al.*, 1998) encontraron que en suelos forestales, la quema y posterior establecimiento del pasto, una porción del carbono más estable pasó a menos estable, mientras que Bird *et al.* (2000) reportaron en estudios similares, que el aumento de la frecuencia del fuego incrementaba los valores de δ^{13} en todas los tamaños de partículas, lo cual indica un aumento de la fracción más ligera de la materia orgánica y consecuentemente la aceleración de las pérdidas.

Esta práctica no se limitó solo a los inicios de la agricultura, téngase en cuenta que hasta hace muy poco, la quema precosecha en el cultivo de la caña de azúcar era un hábito (Rivacova y Morín, 2001).

La degradación de nuestros suelos es bien conocida y sus causas principales están también relacionadas con la gestión agraria de las últimas décadas, algunas de las cuales las resume Funes (2001):

1. Alta especialización, monocultivo y excesiva intensificación;
2. gran dependencia de insumos externos (fertilizantes, agrotóxicos, concentrados, mecanización);
3. deforestación de grandes áreas;
4. ganadería vacuna, avícola y porcina basada en sistemas intensivo-industriales muy poco auto-sostenibles;

Puede esperarse que estos fenómenos hayan repercutido de una forma u otra en la disminución del contenido de carbono de nuestros suelos y esta disminución haya facilitado la manifestación acelerada de procesos de degradación tales como la erosión, la compactación, la salinización secundaria y la disminución de la fertilidad de los suelos.

1.2 Determinación de las Reservas de Carbono Orgánico en los Suelos

1.2.1 Antecedentes y principales metodologías

En Cuba no existen antecedentes de estimaciones de la reserva de carbono orgánico para los suelos minerales a escala nacional ajenas a esta investigación; sin embargo, se han reportado valores aislados para diferentes suelos a partir de perfiles, en estudios de génesis y Tesis de Doctorado, como los de Hernández *et al.* (1988) y estudios realizados en zonas protegidas (Suárez, 1999).

La mayor parte de las estimaciones de la reserva de carbono hechas hasta el presente han sido aproximaciones globales con fines de brindar información sobre el aporte de los ecosistemas terrestres al balance mundial del carbono. Kimble *et al.* (1990) y Eswaran *et al.* (1993), se destacan por el uso en la estimación del carbono, de bases de datos de suelos con perfiles representativos de todo el mundo.

En esencia el procedimiento empleado es calcular la reserva de carbono en un perfil de suelo modal (*Principal Profile Form*, Northcote, 1971) o tipológicamente representativo de unidades cartográficas del Mapa de Suelos del Mundo y asignar el resultado a los polígonos del mapa, apoyados por una plataforma de Sistema de Información Geográfica.

Batjes y Dijkshoorn (1999) determinaron la reserva de carbono para los suelos de la región amazónica utilizando la base de datos de Suelo y Terreno para Latinoamérica SOTER-LAC. Posteriormente Batjes (2000) estudió el efecto de diferentes resoluciones espaciales sobre la determinación de la reserva de carbono para Suramérica utilizando varias fuentes de información a escala global, obteniendo notables diferencias entre los estimados derivados de cada fuente, haciendo ver la importancia que tiene el método de agregación seguido para reflejar la variación espacial de los suelos.

Con el procedimiento de asociación de la reserva calculada para perfiles de suelo con entidades cartográficas, Bernoux *et al.* (2002), determinaron la reserva de carbono en los primeros 30 cm de los suelos de Brasil, pero utilizando como mapa base los polígonos que resultaron del cruce del mapa de vegetación original con el mapa de suelos, a lo que denominaron mapa de asociación suelo – vegetación, además de una base de datos de perfiles de suelo de Brasil. Estos autores reportan una reserva media de 36.4 ± 3.4 Pg C, tales resultados, que representan a los suelos no

disturbados, se proponen como base para la evaluación del impacto de los diferentes usos de la tierra. El trabajo es una ampliación del presentado por Moraes *et al.* (1995) para la cuenca del Amazonas a escala 1:5M y en el que indica que las modificaciones en la reserva de carbono como resultado de los cambios en el uso de las tierras son tan importantes como aquellos que ocurren en la vegetación.

Anteriormente Bernoux *et al.* (1998), habían introducido un concepto interesante en relación a la estimación de la **RCOS** a partir de información faltante, al calcular la reserva en un perfil utilizando un modelo de distribución vertical del carbono con la profundidad y funciones de pedotransferencia para la estimación de los valores de densidad del suelo, así como la aplicación de técnicas geoestadísticas para el estudio de la variabilidad espacial de variables y parámetros y la generalización espacial del cálculo.

Los procedimientos descritos atienden a cuatro aspectos fundamentales, la información disponible, la estimación puntual, la estimación espacial y la necesidad de validar los procedimientos empleados.

1.2.2 Valoración de la información edafológica en Cuba

Para el cálculo de la **RCOS** debe partirse necesariamente de la información edafológica. Los estudios de suelos en Cuba cuentan ya con una larga historia (Hernández *et al.*, 1999), desde antes de la aparición del trabajo de Bennett y Allison (1928), hasta el indiscutible desarrollo de la ciencia del suelo alcanzado en las últimas cuatro décadas, tras el triunfo revolucionario. Los trabajos de cartografía de suelos y otros estudios generan una valiosísima información, tanto cartográfica como de perfiles de suelos, que es la unidad básica fundamental de información para comprender las relaciones entre los suelos y de estos con los factores y fuerzas de su medio (FitzPatrick, 1980).

Los esfuerzos para crear bases de datos del recurso suelo comenzaron desde el arribo de las primeras computadoras, como parte de un temprano proceso de informatización de la sociedad. Diferentes organismos internacionales fomentaron la creación de bases de datos digitales estandarizadas a nivel mundial, como el proyecto del Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente (UNEP) en estrecha cooperación con el Centro de Investigaciones de Recursos de la Tierra (Canadá), la FAO y el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC), que desarrolló una metodología (ISRIC, 1993) para la creación de una Base de Datos

Digital de Suelos y Terrenos a Nivel Mundial, (SOTER), a escala 1:1M, que incluía el uso de la tecnología SIG. Esta base de datos ha sido frecuentemente la fuente de información usada en las estimaciones de la reserva de carbono de los suelos a escala mundial (Kimble *et al.*, 1990; Batjes y Dijkshoorn, 1999; Batjes, 2000; Bernoux *et al.*, 2002).

Cuba participó tanto en la creación de la base de datos SOTER como en la base de datos de suelos de referencia (ISRIC, 1992), dentro del programa NASREC (NAtional Soil REference Collection) como parte de una Colección de Suelos del Mundo. Sin embargo, los esfuerzos por crear un sistema de información edafológica comenzaron en fecha más temprana (Ortega, 1975b), por otra parte el MINAGRI creó una base de datos informativa de perfiles de suelos del Mapa Básico de Suelos, escala 1:25 000, llevada a cabo por la Dirección General de Suelos y Fertilizantes.

Las ventajas que se obtienen de la implementación de bases de datos digitales de suelos pueden resumirse en:

- ◇ Normalización de datos de suelos.
- ◇ Compatibilidad con otras bases de datos a nivel nacional y mundial, lo que permitirá el intercambio de información.
- ◇ Sistema dinámico de información y monitoreo del recurso suelo.
- ◇ Accesibilidad a un grupo amplio de usuarios.
- ◇ Modelo para la transferencia de tecnología.

Otras ventajas se añaden cuando se incorpora la tecnología SIG, para el tratamiento de la información cartográfica, tales como la cartografía automática y los análisis espaciales, entre otras. Sin embargo, el estado de conservación, actualización y características de la información edafológica en Cuba con relación a la informatización, no se corresponde con los esfuerzos y costos de su adquisición.

1.2.2.1 Los mapas de suelos

Los mapas de suelos tradicionales, como representación sinóptica de la realidad, son el resultado de un modelo, donde las clases tienen límites discretos (Burrough, 1993). Metodologías como la de Belovrov *et al.* (1979), estipulan para cada escala un número específico de puntos de muestreo (perfiles y observaciones de barrena) por unidad de área, a partir de los cuales se realiza la

generalización cartográfica de unidades previamente separadas con la ayuda de información auxiliar (Ej. fotos aéreas).

La cartografía de suelos en Cuba, cuyos productos se resumen en la Tabla 1, no puede catalogarse de exigua, dada la amplia cobertura que se ha logrado del territorio nacional y las escalas comprendidas; sin embargo, su estado de conservación es precario, existiendo muy pocos productos preservados en formato digital y menos que utilicen la tecnología SIG, un caso de primera necesidad es la digitalización rigurosa y exhaustiva de la totalidad de la información del Mapa de Suelos, escala 1:25 000.

Tabla 1. Diferentes mapas de suelos editados en Cuba con alcance a todo el territorio.

Escala	Autor/Año	Clasificación/Año	Digital	SIG	Publicado	Disponible
1:1M	IS* (1985)	II Clasificación Genética (1979)	sí	no	no	sí
1:800 000	Bennett y Allison (1928)	Clasificación Morfológica (1928)	sí	no	sí	no
1:500 000	Hernández <i>et al.</i> (1999)	Nueva Versión de Clasificación Genética (1999)	sí	sí	no	sí
1:250 000	IS (1974)	Primera Clasificación Genética (1973)	no	no	sí	sí
1:50 000	DGSF**	Clasificación Morfológica (1928)	no	no	parcial	escasa
1:25 000	DGSF	II Clasificación Genética (1975)	parcial	no	parcial	parcial

* Instituto de suelos. ** Dirección General de Suelos y Fertilizantes.

Otras características propias de la cartografía de los suelos en Cuba, que dificultan su utilización, son:

- ◇ No se presenta como documento anexo la base de datos o caracterización de la unidad cartográfica (fórmula de suelos).
- ◇ No declara explícitamente el perfil representativo o principal que caracteriza a la unidad cartográfica.

Estos inconvenientes no se superan totalmente con la aparición del resultado más reciente, el mapa “Suelos 500 000” de Hernández *et al.* (1999), que no obstante confrontar problemas de tipo cartográfico, tales como la georreferencia y la existencia de polígonos ficticios, es un producto muy oportuno dado que es portador de la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba y se presenta en formato digital en una plataforma SIG (Mapinfo 4.5).

1.2.2.2 La información de perfiles de suelo

La información de perfiles de suelos es la más valiosa para cualquier estudio por no tener la pérdida de información que representa la generalización cartográfica implícita en los mapas de suelos, pero resulta generalmente escasa, en cuanto a la representación de la variabilidad intrínseca de los suelos que pretende representar a una escala específica.

Por otra parte, se puede considerar incompleta, debido a que por razones económicas no se caracterizan por igual todos los horizontes de un perfil estudiado.

Su utilización se dificulta debido a la falta de estandarización, cuando se compila información de diferentes fuentes, dado que aún hoy se padece la ausencia de un Sistema de Información edafológica en el cual estén organizados los valiosos datos acumulados desde el pasado siglo, de manera consistente y funcional, y las bases de datos digitales no han alcanzado su madurez, tal como se muestra en la Tabla 2.

Otros datos como la información original de los perfiles del mapa de suelos morfológico a escala 1:50 000, se ha perdido mayoritariamente.

El logro mayor en este tema lo constituía la base de datos perteneciente al Mapa de Suelos, escala 1:25 000, pero lamentablemente su estado de conservación es crítico, quedando en desuso, a favor del sistema conocido por el acrónimo de “Perfil25”.

Perfil25, generalizado por el Instituto de Suelos, recibió un masivo impulso como respuesta a la necesidad de información demandada por el trabajo de “Evaluación Preliminar de la Aptitud Física de las Tierras para el cultivo de la Caña de Azúcar”, promovido por el MINAZ y la participación directa del INICA (Balmaseda y Ponce de León, 2002), este sistema desarrollado sobre Microsoft Access no conservó todas las buenas cualidades de su predecesor, como la codificación exhaustiva, presentando problemas de validación, redundancia e inconsistencia, características fundamentales de operabilidad de las bases de datos (Ullman, 1985).

Tabla 2. Principales bases de datos de suelos confeccionadas en Cuba.

Acrónimo	Institución	Perfiles	Georreferenciada	Codificada	Activa
Suelo25	DGSF	3000*	SÍ	SÍ	NO
SICCA	INICA	1500	NO	NO	NO
NASREC-SOTER	INICA	32	SÍ	SÍ	Parcial
Perfil25	IS	?	SÍ	Parcial	SÍ

*Indica un valor estimado parcialmente.

1.2.3 Valoración de los errores asociados al cálculo de la *RCOS* en un perfil de suelo por el método tradicional

El análisis de los errores del método tradicional para la determinación de la reserva de carbono orgánico, es un punto de base para la comparación de cualquier procedimiento de determinación alternativo; este análisis se hará a partir de las variables implicadas en el cálculo para un horizonte de profundidad h , donde intervienen además del *COS*, la densidad del suelo d_s y las inclusiones I .

1.2.3.1 Profundidad (h)

La potencia del horizonte es medida en el campo con la precisión de medio centímetro, y el error que se pudiera cometer es despreciable, sobre todo debido a que la sobrestimación o subestimación del horizonte medido aumentaría o disminuiría la potencia del próximo a medir, compensando en gran parte el error, además la profundidad total del perfil no se alteraría, e influye poco, ya que los horizontes inferiores son muy pobres en carbono.

1.2.3.2 Carbono orgánico del suelo (*COS*)

La determinación del porcentaje de *COS* sí es fuente de errores. En primer lugar está el error de muestreo. Se asume que la muestra es representativa de todo el horizonte muestreado y que por tanto el valor determinado en el laboratorio es una especie de media de las múltiples capas que componen dicho horizonte, lo que no es siempre cierto, dado que los muestreos por lo general se toman con barrena del tipo holandesa, o directamente de la cara expuesta del perfil de suelo.

Al error de muestreo se debe añadir el error analítico del laboratorio. En los métodos de Tiurin y Walkley-Black, en realidad lo que se mide es la cantidad de bicromato de potasio reducido al reaccionar con el suelo, se asume que el único reductor que se encuentra en el medio es el carbono orgánico y que el estado de oxidación del mismo es igual a cero, lo cual es relativamente cierto. Con los métodos de Tiurin (Belchikova, 1965), el error relativo es del 5-6% en los horizontes superiores, para un error absoluto entre 0.1 y 0.3%. Con el método de Walkley-Black (Jackson, 1970), el error puede llegar al 10%, tal que Allison (1965), lo consideraba semicuantitativo con respecto al método de combustión seca.

Los datos se expresan comúnmente como MO y no como carbono, para lo cual la cantidad de reactivo reducido en el análisis, se multiplica por 1.724, pues se asume que aproximadamente el

58% de la MO de los suelos es carbono (Orlov *et al.*, 1969), lo cual está muy cercano a la realidad de la mayor parte de los suelos.

1.2.3.3 Densidad del suelo (d_s)

El método usualmente usado es el gravimétrico, que es fuente de errores a veces bastante groseros, pues presupone una homogeneidad espacial del parámetro, lo cual se aleja de la realidad a medida que aumenta la capacidad de agrietarse de los suelos. Para obtener un valor medio aceptable se deben hacer un mínimo de cinco réplicas, desechando los valores extremos (Modina y Dolgov, 1966). La diferencia entre las réplicas suele exceder a 0.1 Mg.m^{-3} , o sea el error relativo de esa determinación es del orden del 10% en el horizonte superficial.

Por otra parte se debe recordar que este parámetro depende del estado de humedad del suelo, sobre todo en los suelos de arcillas dilatables (Orellana, 1991), sin que existan prácticamente datos de humedad para establecer la relación densidad del suelo / humedad, y con ello lograr valores realmente comparables. En la Figura 2, se observa dicha relación, en suelos con predominio de minerales arcillosos expansibles.

La densidad del suelo es también función del peso específico de sus constituyentes. Como se muestra en la Tabla 3, esos valores varían en rangos bastante amplios; no obstante, como cada tipo genético se caracteriza por presentar una combinación característica de minerales, el factor peso específico no afecta la precisión de las determinaciones.

La densidad de los suelos está seriamente afectada por el manejo de los mismos. En primer lugar depende del estado estructural, y este a su vez, de la MO. El uso continuo e irracional de los suelos hace que los contenidos de MO disminuyan, pierdan por ello su estructura general y se hagan más compactos. Este fenómeno negativo se ve acelerado por el uso de la maquinaria agrícola, un ejemplo son los suelos ferralíticos (Frómata, 1983).

Por todas las causas señaladas el parámetro “densidad del suelo” es muy variable, en los suelos cultivados, aún dentro de una misma especie de suelo.

1.2.3.4 Inclusiones (I)

En una gran parte de los suelos la presencia de estas inclusiones es reducida o inexistente, pero en otros suelos pueden alcanzar valores altos. Las gravas u otro tipo de materiales groseros, que son extraídos en el proceso de preparación de la muestra antes de entrar en los laboratorios (Allison,

1965), deben ser deducidos del volumen total del suelo al establecer los cálculos. Como los pesos específicos de las arcillas, la calcita y el cuarzo (Tabla 3) son semejantes, se pueden realizar los cálculos porcentuales sin tener que tomarlos en cuenta; solamente en el caso de los suelos altamente concrecionarios del tipo nodular ferruginoso, vale la pena tomar en consideración el peso específico de las concreciones, que debe presumirse en ese caso semejante al de la hematita. Lo más frecuente es encontrar información cualitativa sobre el contenido de inclusiones, expresándose en porcentaje de cubrimiento de la cara expuesta del horizonte en el perfil.

Ese parámetro puede calcularse con un error absoluto de un 2.5% de cubrimiento si se emplean las cartas comparativas que aparecen en las tablas de colores de suelo (Oyama y Takehara, 1967), pero estas tablas son escasas en Cuba, y por tanto, poco empleadas, por lo que los porcentajes se dan basados en la experiencia del especialista, cuyo error, con seguridad sustancialmente mayor, no es grave. Por ejemplo, para un suelo con un 10% de gravas y un error absoluto $\pm 5\%$, el error relativo es del 50%; pero como en el cálculo de las reservas se multiplica por $(1 - I_i)$, el llamado plasma del suelo, que es determinado como la diferencia de las inclusiones con la unidad, el error relativo estará alrededor del 5%.

En los horizontes muy pedregosos donde el error de la estimación del plasma puede ser grande, el contenido de materia orgánica es generalmente muy bajo, por lo que el error tendrá poco efecto en la estimación total de las reservas del perfil.

1.2.3.5 Resumen de los errores del método tradicional

La reserva de cada horizonte se puede lograr obtener con una precisión fluctuante entre el 20 y 26% (Tabla 4). En los suelos muy pedregosos o gravillosos el error inducido por el último factor aumenta de manera notable, por lo que la precisión es aún menor, mientras que en los suelos sin inclusiones esa fuente de error llega a desaparecer. El error relativo de la densidad del suelo tiende a disminuir con la profundidad, al hacerse más homogéneo el material. El error relativo del contenido de carbono, por el contrario, aumenta a medida que su contenido absoluto se reduce.

Los errores derivados por la falta de precisión intrínseca en la determinación de las reservas de carbono de los suelos y la escasez de información para la estimación puntual en cada perfil de suelo, obliga a emplear un gran número de datos con la esperanza de que los errores se compensen entre ellos, gracias a la cantidad de información.

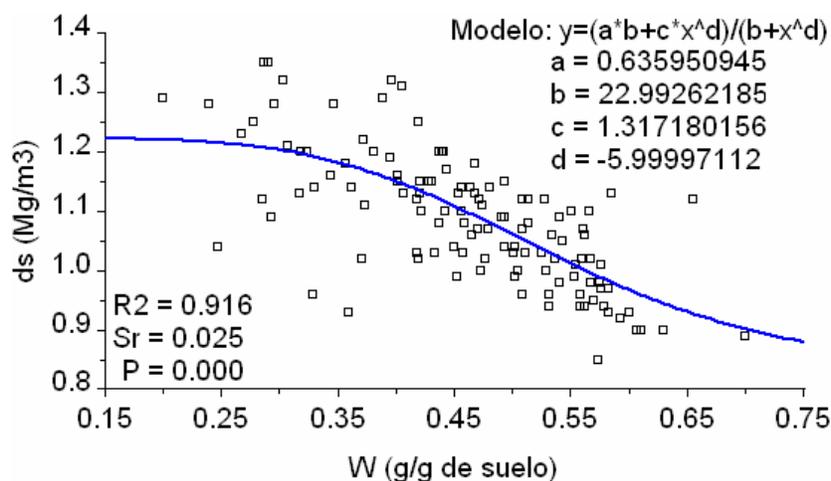


Figura 2. Variación de la densidad del suelo (d_s) con la humedad (W) en suelos 05a (Vertisol Pélico típico)¹.

Tabla 3. Peso específico de componentes del suelo (modificada de FitzPatrick, 1980).

Mineral	ρ_s (Mg.m ⁻³)
Calcita	2.6-2.8
Cuarzo	2.5-2.8
Caolinita	2.0-2.5
Montmorillonita	2.0-2.4
Hematina	4.9-5.3
Limonita	2.7-4.3
Bauxita	2.4-2.5
Mica	2.7-3.1
Materia orgánica	1.1-1.4

Tabla 4. Resumen de los errores estimados del cálculo de la reserva por el método tradicional.

Atributo	ErRel (%)	ErAbs	Importancia	Observaciones
%C Tiurin	5-6	0.1-0.3%	grande	Más el error de muestreo
%C Walkley-Black	10	0.3-0.5%	grande	Más el error de muestreo; subvalora el contenido de COS , mayor en suelos salinos
d_s Mg.m ⁻³	10	0.1 Mg.m ⁻³	grande	No se tiene en cuenta la humedad
h cm	1-5	0.5 cm	poca	Se compensa
1-I	5	50% de I	media	Cualitativa, depende del contenido de I

¹ Datos originales brindados por el Dr. Jorge Pérez Lima del proyecto "Manejo integrado de vertisuelos con tecnologías sostenibles para la producción cañera".

1.2.4 Determinación de la RCOS a partir de modelos de distribución vertical de la materia orgánica en el suelo

El Tipo genético de suelo se caracteriza por tener una misma combinación de procesos edafogénicos que dan como resultado un mismo tipo de perfil genético (Zonn, 1968). La humificación es uno de los principales procesos edafogénicos, inclusive se puede afirmar que lo que diferencia a los suelos de los sedimentos es la presencia de humus.

En la Figura 3 se muestran los dos tipos principales de distribución de la materia orgánica con la profundidad de acuerdo al tipo de vegetación. La distribución de la materia orgánica en los suelos minerales depende principalmente de dos aspectos:

- ◇ El lugar y naturaleza de los aportes de materia orgánica fresca en el suelo.
- ◇ Los procesos de transporte de materia en el suelo.

Bajo condiciones forestales, la fuente principal de residuos es la hojarasca que se deposita en la superficie, mientras que en los suelos bajo vegetación herbácea, pastos por ejemplo, los aportes provienen fundamentalmente de las raíces que constituyen un renuevo anual, para el caso de los cultivos comerciales, pueden considerarse más cercano al segundo caso, en dependencia del cultivo y el manejo de los residuos de cosecha.

Los procesos de lavado tienen una fuerte relación con el tipo de humus en las zonas templadas y frías, mientras que en las zonas cálidas depende del clima (Duchaufour, 1984).

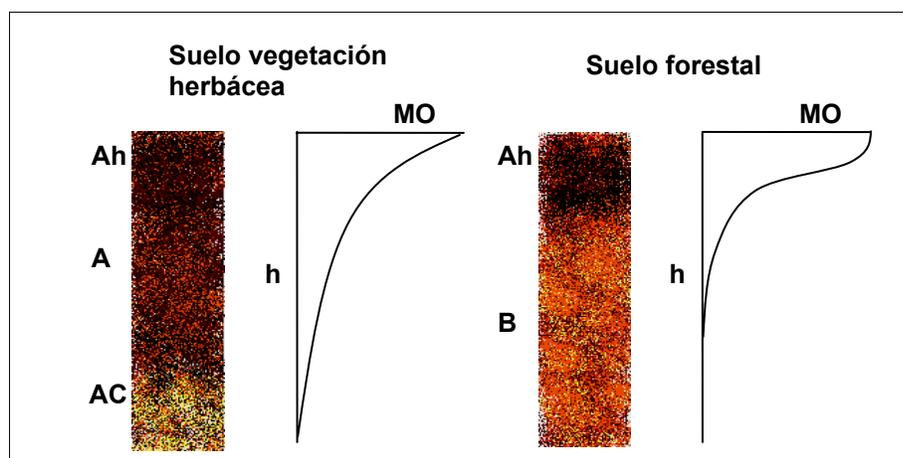


Figura 3. Modelos de distribución de la materia orgánica (MO) en el suelo con la profundidad (h) de acuerdo al tipo de vegetación.

Existen otros tipos o modelos de distribución más compleja como es el caso de los suelos con procesos de podzolización, típico de los climas templados, donde ocurren incrementos del

contenido de materia orgánica en horizontes subsuperficiales. En nuestras condiciones de clima cálido y contrastado, en suelos de dos miembros con hidromorfía temporal, el proceso de ferrólisis (Brinkman, 1970) acentúa el empobrecimiento del horizonte A2, y pueden aparecer también incrementos de materia orgánica en el horizonte Bt (Hernández *et al.*, 1984; Ponce de León *et al.*, 1988), pero el humus no juega en este caso ningún papel y en Cuba este tipo de suelos tienen una escasa representación espacial.

Dentro de cada tipo genético, los individuos edáficos deben tener un mismo tipo de humus, así como una distribución semejante por el perfil, (Tiurin, 1937b; Volobuev, 1963; Duchaufour, 1968), este último aspecto sugiere que tal distribución pueda ser modelada por una función matemática que caracterice a un grupo específico de suelos, ya que la distribución del carbono a través del perfil es generalmente decreciente y monótona.

Basado en este principio, Bernoux *et al.* (1998), calcularon la reserva de carbono de un perfil mediante un modelo exponencial amortiguado, sugerido por Arrouays y Péliissier (1994), para los suelos forestales de Francia, de la forma:

$$(Ch - C2)/(C1 - C2) = (e^{-bh} - e^{-bh2})/(e^{-bh1} - e^{-bh2}) \quad [1.1]$$

Donde: h y Ch son la profundidad mediana y el contenido de carbono a la profundidad h respectivamente y b es el coeficiente de amortiguación.

El modelo se ajustó bien para los suelos forestales, evaluando dos profundidades (0 y 100 cm), excepto para los suelos podzólicos del Amazona brasileño.

1.2.4.1 Ajuste de Curvas

Cuando se trata de modelar el comportamiento de cualquier variable mediante una función matemática, un problema es la elección de la función y el número de parámetros de la curva. La función debe tener un comportamiento lógico acorde al problema que se plantea, lo que debe estar acompañado por el análisis de los máximos, mínimos e inflexiones de la curva. Lo “ideal” es aplicar un modelo en que los parámetros tienen un sentido físico, tal como ocurre con la ecuación de Van Genuchten (1980), pero esto no siempre se logra y el uso de modelos empíricos con fines de estimación es frecuente.

Generalmente se elige una función entre dos o más candidatas mediante alguna medida del ajuste o falta de ajuste de los datos a la curva que se genera, sin tomar en consideración la distribución

de los residuos y el número de parámetros del modelo, este detalle es importante pues un número elevado de parámetros en un modelo compromete su sencillez y por tanto su uso en la práctica.

Como medida de ajuste generalmente se usa la desviación estándar residual Sr que estima la dispersión de los puntos alrededor de la curva de regresión y el coeficiente de determinación R^2 que expresa la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por la variable independiente, según:

$$Sr = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{N - p}} \quad [1.2]$$

$$R^2 = 1 - \frac{Sf}{Sm} \quad \text{ó} \quad R^2 = \frac{Sm - Sf}{Sm} \quad [1.3]$$

Esta última expresión resultado de elevar al cuadrado al coeficiente de correlación r , que relaciona la desviación con respecto a la media de la población de puntos y la desviación con respecto a la función ajustada:

$$r = \sqrt{\frac{Sm - Sf}{Sm}} \quad [1.4]$$

Donde:

Sr - Desviación estándar residual; y_i - valor del punto i ; $f(x_i)$ - función ajustada;

N - Número de puntos y p - número de parámetros. La expresión $N-p$ representa los grados de libertad.

Sm - Desviación de los puntos con respecto a la media \bar{y} , dada por:

$$Sm = \sum_{i=1}^N (\bar{y} - y_i)^2 \quad [1.5]$$

Sf - Desviación con respecto a la función ajustada, dada por:

$$Sf = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \quad [1.6]$$

En este caso r toma valores negativos sólo cuando hay un muy mal ajuste y la media ajusta mejor que el modelo en cuestión. Nótese que dicho coeficiente de correlación esta referido al ajuste entre los datos y el modelo. La F estadística se calcula como:

$$F = \frac{(Sm - Sf)/(p - 1)}{Sf/(N - p)} \quad [1.7]$$

Otra posibilidad en el análisis del ajuste de un modelo es mediante el estadígrafo de “falta de ajuste” que es posible calcular cuando hay múltiples observaciones de la variable dependiente por un valor de la variable independiente, y que busca separar la varianza atribuida al error de la explicada por el modelo. En este caso se puede afirmar que la falta de ajuste al modelo en cuestión es significativa, cuando el valor de la F estadística es mucho mayor que uno ($F \gg 1$). Existen herramientas basadas en la teoría de la información que permiten seleccionar un modelo teniendo en cuenta el número de parámetros, tales como el criterio de Akaike (AIC⁶; Akaike, 1973), el criterio de Bayes (BIC⁷; Schwarz, 1978) y otros.

El criterio de Akaike, ha sido usado para seleccionar un modelo de acuerdo al número de parámetros en funciones de pedotransferencia (Minasny *et al.*, 1999). Dicho criterio permite tener un indicador para seleccionar entre dos funciones candidatas con diferentes R^2 y está dado por:

$$AIC = N \ln \left[\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] + 2p \quad [1.8]$$

Donde: *AIC* – Criterio de información de Akaike; y_i - valor real en el punto i ; \hat{y}_i - valor estimado en la función $f(x_i)$.

1.2.5 Generalización espacial. Nuevo paradigma en el tratamiento de la información edafológica

La exactitud de cualquier predicción basada en el mapa de suelos depende tanto de la exactitud con que se prediga la unidad tipológica (clasificación), como del límite de la unidad cartográfica, en la localización que se va a predecir.

Los mapas y clases de suelos (*taxas*) tradicionales presentan límites discretos precisos tanto en el espacio de las variables (clasificación) como en el espacio geográfico, lo cual es una imposición artificial a la reconocida naturaleza gradual y continua de los suelos, dado que los factores y procesos de formación que le dan origen son continuos en el espacio y en el tiempo.

Un mapa de suelos convencional (y de cualquier otro atributo de la naturaleza) presupone con respecto a la variación espacial según (Burrough y McDonnell, 1998), que:

- ◇ Las variaciones dentro de la unidad cartográfica son aleatorias y no espacialmente continuas.

⁶ Akaike Information Criterion.

⁷ Bayes Information Criterion.

- ◇ Todas las unidades del mapa tienen la misma varianza intra-clase.
- ◇ Todos los atributos están normalmente distribuidos.
- ◇ Todos los cambios espaciales ocurren en los límites de las entidades y éstos son discretos.

Aunque estas presunciones no son estrictamente obligatorias, de un mapa se espera que la varianza intra - polígonos sea significativamente menor que la varianza entre - polígonos. En este aspecto influyen los métodos de generalización usados para reflejar la variación espacial intrínseca del objeto cartografiado (Batjes, 2000).

La dependencia espacial de las propiedades del suelo, fue reconocida por Fisher para muchas características de los suelos desde la década del 20 del pasado siglo, en experimentos efectuados en la estación de Rothamsted y en general, dicha variabilidad se manifiesta más fuertemente en las características químicas (Trangmar *et al.*, 1985; Webster, 1985), de ahí que sea siempre preferible asumir que existe dependencia espacial más bien que lo contrario (Burrough, 1991).

La combinación de algoritmos de interpolación espacial basados en la caracterización de la variabilidad espacial intrínseca de una variable por medio de una función de auto - covarianza y la utilización de la lógica difusa (*fuzzy sets*) para la representación de los límites de las clases, se ha dado en llamar “Nuevo Paradigma” (McBratney, *et al.*, 1992; Ponce-Hernández, 1994; Burrough, *et al.*, 1997), nuevo en contraposición a considerar métodos de interpolación que no tienen en cuenta la variabilidad espacial de las variables a estimar y la representación de límites espaciales y de las clases mediante la lógica discreta.

Como breve referencia, se puede decir que la aplicación de la teoría de conjuntos difusos en la clasificación de los suelos ocurrió cuando se evidenció que las clases discretas obtenidas de métodos estadísticos anteriores no eran capaces de representar con la precisión deseada la variación espacial gradual de las propiedades reales de los suelos. McBratney y deGruijter (1992) señalan la necesidad de un enfoque continuo en la clasificación del suelo, indicando a la lógica difusa como la más apropiada a estos fines. En la década del 80 se crearon procedimientos que permitían obtener clases difusas, uno de los cuales, probablemente el mejor y más comúnmente usado es el *fuzzy c-means* (Bezdek, 1981), que fue llamado después *fuzzy k-means* por deGruijter y McBratney (1988), como una generalización del algoritmo discreto *k-means*.

En esta investigación no se aplicará la teoría de conjuntos difusos, por ser en sí mismo un tema que merece y necesita de un trabajo de investigación profundo, aún no tratado en nuestra ciencia

del suelo, sí se hará hincapié en los métodos de interpolación, como fundamento básico para la generalización espacial de la reserva de carbono.

1.2.5.1 Métodos no geoestadísticos

La generalización espacial de los valores de cualquier atributo distribuidos en un espacio euclidiano R^d con localización conocida, se puede plantear como un problema de creación de una superficie continua a partir de puntos de observación (Ej. perfiles) mediante algún procedimiento de interpolación.

Burrough y McDonnell (1998) definen a la interpolación como el procedimiento de predecir el valor de un atributo en un lugar no medido a partir de observaciones puntuales localizadas dentro de una misma área o región. La lógica que lo sustenta, es que los valores situados más cercanos en el espacio, deben ser más similares que aquellos que están más separados. La interpolación de cualquier atributo con localización x_i, y_i (a partir de ahora u_i) es una necesidad cuando se requiere que el atributo en cuestión cubra totalmente el dominio espacial, lo anterior es claro para el cálculo de la reserva de cualquier elemento, puesto que implica a toda el área investigada.

Burrough y McDonnell (ob. cit.) clasifican los métodos de interpolación en métodos globales y métodos determinísticos locales.

Métodos globales:

- ◇ Modelos de clasificación que usan información externa.
- ◇ Superficies de tendencia sobre coordenadas geométricas.
- ◇ Modelos de regresión que utilizan variables de más fácil adquisición.
- ◇ Métodos del análisis espectral.

Métodos determinísticos locales:

- ◇ Polígonos de Thiessen o Voronoi.
- ◇ Métodos de distancia inversa.
- ◇ Splines.

Los métodos anteriores solo requieren una comprensión de los métodos estadísticos simples o determinísticos, los métodos geoestadísticos pueden agruparse de manera separada debido a que requieren una comprensión de los principios de la autocorrelación espacial estadística (Myers, 1994).

Sin embargo, la aplicación de los métodos globales o determinísticos, no deben emplearse sin la verificación de la existencia o no de correlación (dependencia) espacial de la variable a estimar y

la selección del método de interpolación es una decisión crucial que depende de varios aspectos fundamentales:

1. Naturaleza de los datos a interpolar, tipos de variables.
2. Disponibilidad y cantidad de información.
3. Distribución espacial y estructura espacial de las variables a interpolar.

Para el caso del carbono, Hibbard *et al.* (2002) reconocen que un aspecto importante en el estudio de los reservorios, son los patrones y variabilidad de la distribución espacial y temporal, tal como ocurre para otros elementos. Las técnicas geoestadísticas, permiten estudiar dicha variabilidad. Conant *et al.* (2003) demuestran que la variabilidad espacial intrínseca del carbono del suelo limita la precisión de la medición del carbono y la determinación de cambios en su contenido cuando se trata de probar el efecto de un cambio de uso de la tierra en el secuestro de carbono.

1.2.5.2 Métodos Geoestadísticos

1.2.5.2.1 Antecedentes

La geoestadística ya tiene un cuarto de siglo, si se cuenta como fecha de partida el comienzo del auge en su aplicación, con la publicación del libro intitulado “*Mining geostatistics*” (Journel y Huijbregts, 1978), aunque sus principios fueron formulados por Matheron (1962), a comienzos de la década del 1960, en una evolución que comenzó desde principios del siglo XX.

Sus fundamentos han sido ampliamente abordados desde su surgimiento, en el que se observan tres etapas, en lo que concierne a las ciencias del suelo (McBratney *et al.*, 2000):

1. Atención a los problemas estructurales, optimización de muestreos y la estimación 2D y 3D en lugares no medidos,
2. La simulación geoestadística, y en la actualidad,
3. La estimación y simulación espacio – temporal mediante una misma función aleatoria.

En la literatura diversos autores cubanos han abordado aplicaciones a la ciencia del suelo, como por ejemplo: Ortega *et al.*, 1987; Utset *et al.*, 1989; 1998; Ponce de León *et al.*, 1991; 1999; además de estar presentes en Tesis de Doctorado (Utset, 1993; Otero, 1993 y González-Posada, 2001); sin embargo, aún hoy, ni es ampliamente conocida – utilizada, ni divulgada, en el sentido de que no tiene una presencia en los trabajos que tratan problemas espaciales y el hecho de que solo es tema de esporádicos postgrados a diferencia de otras universidades del “primer mundo” donde se aborda en pregrado, al igual que la teoría de Sistemas de Información Geográfica.

No obstante su amplia difusión y tratamiento en textos básicos y revistas especializadas, se señalarán, en el Anexo 1, algunos tópicos necesarios para la mejor comprensión de los temas abordados en esta Tesis, analizando a continuación algunos aspectos fundamentales.

1.2.5.3 Predicción usando variables externas

En los últimos años ha tomado auge el uso de técnicas de interpolación híbridas, las cuales utilizan una combinación de las técnicas geoestadísticas con los modelos determinísticos clásicos (Wackernagel, 1998), a los cuales McBratney *et al.* (2000) denominan CLORPT, tales como los que consideran al suelo como una función de factores de formación, en referencia a la expresión de Jenny (1941):

$$S = f(\text{Cl, O, R, P, T}) \quad [1.9]$$

Donde el suelo S se expresa como una función de los factores de formación: clima (CL), organismos (O), relieve (R), material parental (P) y el tiempo (T); preconizados desde la aparición de la obra “El Chernoziom ruso” en 1883 de V. V. Dokuchaev (Ortega, 1983), y expresados en la fórmula dokuchaeviana:

Factores de formación - Tipos de suelos

Posteriormente esta fórmula fue modificada por discípulos de Dokuchaev y llamada neodokuchaeviana:

Factores de formación – Procesos de Formación – Tipos de suelos

La expresión de los factores mediante los procesos de formación en el tiempo, son los que provocan que los suelos, en sus múltiples manifestaciones, parezcan ser fenómenos aleatorios más que determinísticos, como reconoce Webster (2000). Las implicaciones de este supuesto, son una guía certera para el análisis de cuándo un modelo se ajusta o no al objeto en cuestión, de ahí que contrario a lo que se piensa, los estudios de génesis de suelo cobran hoy una importancia y validez extraordinaria, para el empleo exitoso de las más avanzadas abstracciones matemáticas.

McBratney *et al.* (2000) hacen ver que si se considera al vector de datos que describen a una propiedad del suelo, como una variable aleatoria Z , determinada en localizaciones en una región $U = u_1, u_2, \dots, u_N$, expresada en tres componentes:

$$Z(u) = m + Z_1(u) + \varepsilon(u) \quad [1.10]$$

Donde: m es la media local de la región; $Z_1(u)$, es el componente espacialmente dependiente y ε el término de error residual, la aplicación de una variable externa cobra sentido cuando m varía en

la región condicionada por alguna causa externa, es decir existe tendencia. No obstante, es cada vez más frecuente el uso de una variable externa para mejorar la estimación, sin necesidad de que dicho efecto se observe en el semivariograma experimental, es decir se asume un modelo de tendencia subyacente al problema estudiado.

Tal es el caso del carbono, cuando se asume que los procesos de acumulación de humus responden a tipos definidos de edafogénesis (factores determinísticos), como ya se discutió.

Powers y Schlesinger (2002) utilizaron variables biofísicas (bióticas y abióticas) para predecir la capacidad de almacenamiento de carbono en lugares no muestreados, tales como: biomasa, índice de productividad, distribución de partículas, mineralogía, altura y pendiente. Estos autores hallaron, que las variables co-variaban de una manera predecible con la capacidad de almacenamiento del *COS*, pero de una manera diferente con la altura.

Mueller y Pierce (2003) aplicaron diferentes técnicas de interpolación (kriging ordinario, kriging con un modelo de tendencia, co-kriging, kriging con tendencia externa, y regresión múltiple) para estudiar como la escala del muestreo y el uso de variables externas, afectaban la calidad de la estimación espacial del carbono, validando de forma independiente cada mapa con 24 observaciones. Dichos autores encontraron pequeñas diferencias para una cuadrícula (*grid*) de 30 m, pero para mayores separaciones y menos datos los procedimientos que usaron una variable externa dieron un mejor resultado, hasta que el número de puntos fue una limitante para la aplicación de los métodos geoestadísticos. La regresión múltiple resultó un buen estimador.

Los procedimientos más aceptados en la actualidad para la estimación usando una variable externa cualitativa como el subtipo de suelos, son el kriging simple con media local (KSml) y el kriging con tendencia externa (KTE), debido a que no necesitan caracterizar la estructura espacial de la variable secundaria (McBratney *et al.*, 2000).

1.2.5.4 Incertidumbre de la estimación espacial

Como se vio anteriormente, la incertidumbre depende de la calidad de la información disponible. Burrough y McDonnell (1998), señalan como la vía más simple pero más intensiva desde el punto de vista computacional para abordar el estudio de la incertidumbre en la estimación espacial, considerar que cada atributo se distribuye acorde a una función de distribución de probabilidades (*fdp*) Gausiana (Normal), con una μ y σ^2 conocida en cada entidad o celda, utilizando una sola función para todas las celdas (estacionaridad) o estimando funciones

específicas para cada celda cuando se tiene información sobre la continuidad espacial (condicional).

La incertidumbre local es completamente modelada por la función de distribución acumulativa condicional (*fdac*, Goovaerts, 2001):

$$F(\mathbf{u}; z | (n)) = \text{Prob}\{Z(\mathbf{u}) \leq z | (n)\} \quad [1.11]$$

Donde: $| (n)$, expresa un condicionamiento a los n valores de la variable $z(\mathbf{u}_\alpha)$ de la vecindad.

La *fdac* modela completamente la incertidumbre del valor desconocido en la localización \mathbf{u} , ya que da la probabilidad de que dicho valor no sea mayor que cierto umbral z . Las herramientas de la geoestadística que permiten modelar la incertidumbre son: el kriging multiGausiano y el kriging disyuntivo, como métodos paramétricos y el kriging indicador, como no paramétrico.

En la actualidad son más usados algoritmos de simulación estocástica, cuya idea básica es generar una serie de realizaciones igualmente probables de la distribución espacial de los valores de los atributos del suelo y usar diferencias entre los mapas simulados como criterio de incertidumbre (Goovaerts, 2001). Los principales usos de la simulación estocástica han sido:

1. Evaluar el riesgo en que se incurre en un proceso de toma de decisiones, e
2. Investigar como los errores de predicción se propagan a través de funciones complejas.

Si el variograma de la propiedad es conocido se puede simular una superficie (imagen estocástica) con similares características espaciales (Burrough y McDonnell, 1998), esto es, *nugget*, *sill* y rango.

Una aproximación numérica a la simulación es el método de Monte Carlo (debido a "...la confianza en el azar" *reliance on chance*; Burrough y McDonnell, 1998), por medio del cual, la *fdac* de \mathbf{z} a \mathbf{u} muestreada n veces de forma aleatoria, proporciona un conjunto de valores \mathbf{z} simulados $\{z^{(l)}(\mathbf{u}), l = 1, \dots, L\}$ (Goovaerts, 2001)

El número de realizaciones L debe ser mayor o igual a 100, el cálculo de la media y la varianza a partir de ellas, se logra por pos procesamiento de las L simulaciones Gaussianas (sGs), si se divide el mapa de desviación estándar por el mapa de la media de la variable investigada se obtiene un mapa del error relativo de la estimación.

1.2.6 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La Geografía como ciencia se ocupa de describir y explicar las distribuciones espaciales, es decir, la frecuencia con que ocurre algo sobre el espacio (Martín, 1991; citado por Gutiérrez y Gould,

1994). Por lo que un aspecto de principal importancia es la localización, en este sentido los SIG han constituido una revolución no solo en las ciencias geográficas sino en la información al incorporar el aspecto espacial en el tratamiento de numerosas temáticas.

Existe una amplia bibliografía básica impresa sobre SIG (Aronoff, 1989; Gutiérrez y Gould, 1994; Burrough y McDonnell; 1998) y digital en Internet; sin embargo, en nuestro país aún se hace difícil hallar materiales en nuestra lengua a excepción de algunos esfuerzos no publicados como el de Ponce de León *et al.* (1999), a continuación se hace referencia a algunos conceptos claves utilizados en el desarrollo de la Tesis.

1.2.6.1 Definición

Burrough y McDonnell (1998) agrupan las definiciones de SIG según el enfoque: los SIG como cajas de herramientas (Burrough, 1986), los SIG como bases de datos (Duecker, 1979) y los SIG como entidad organizadora orientada a los Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones en la solución de problemas complejos de planificación y gestión (Cowen, 1988).

Una definición más completa es la dada por NCGIA (1990):

“Un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la solución de problemas complejos de planificación y gestión”.

Los SIG constituyen un factor de integración tecnológica sin limitar el campo de aplicación de las otras tecnologías, siendo a la vez portadores de características propias (ejemplo de ello son la superposición de mapas, el álgebra y la modelización espacial).

1.2.6.2 Modelos de representación del espacio geográfico

Un modelo representa un objeto o fenómeno que existe en el mundo real, el mejor modelo es aquel que de una forma simple predice correcta y consistentemente el comportamiento de los fenómenos que interesan de la realidad (Aronoff, 1989).

Cuando se va a representar el mundo real en un SIG se hace mediante una simplificación del mismo, seleccionando los elementos y relaciones que son de interés para el estudio que se realiza. Según Gutiérrez y Gould (1994), las reglas por las que se modela lo existente utilizando objetos discretos constituyen el Modelo de Datos. En los SIG se emplean diferentes modelos en función de la información que se trata.

Los modelos y estructuras de datos para las Bases de Datos Espaciales son el modelo *raster* o de celdas y el modelo vectorial. Los fenómenos que presentan una continuidad en el espacio, son mejor modelados por el modelo *raster* (Burrough y McDonnell, 1998), el cual no asume ningún conocimiento a priori de la variabilidad, es por ello que en las aplicaciones relacionadas con las ciencias ambientales el uso del modelo raster es el más común.

1.2.6.3 Solución de problemas mediante el SIG

De acuerdo con Rhind (1990) las cuestiones a las que puede responder un SIG son:

1. Localización: recupera información sobre un lugar determinado.
2. Condición: visualiza las localizaciones que cumplen determinadas condiciones.
3. Tendencias: tiene en cuenta la componente temporal.
4. Rutas: calcula caminos óptimos.
5. Pautas: determina patrones espaciales de distribución de un fenómeno.
6. Modelos: el SIG como herramienta de predicción.

Lo fundamental en el análisis mediante SIG es la búsqueda de patrones de distribución espacial, la explicación de los fenómenos a través de esos patrones y las predicciones que puedan derivarse del conocimiento del fenómeno mediante tales patrones. Esto se logra con la conversión del problema planteado en un problema propio de SIG (Burrough y McDonnell, 1998), como muestra la Figura 4.

Para ello, las diferentes plataformas de software SIG brindan numerosas funciones y procedimientos así como la posibilidad de automatización con lo que facilitan el trabajo con grandes bases de datos espaciales y de atributos.

En Cuba ya es cada vez más frecuentes el uso de los SIG en diferentes esferas de las investigaciones del medio geográfico, la economía y la planificación, pero pese a todas las posibilidades que ofrecen los SIG, en la mayor parte de las aplicaciones sólo se usan por sus facilidades de cartografía automatizada, con un pobre diseño y no como medio de modelación y análisis; no obstante, algunas aplicaciones recientes en las ciencias ambientales abogan por un correcto diseño, tales como el SIG para el manejo de los datos de diversidad biológica del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, el sistema para el manejo de las Regiones Especiales de Desarrollo Sustentable (Martín, 2000) y en la agricultura cañera (Ponce de León *et al.*, 1999),

1.2.6.4 Propagación de errores en el SIG

Los datos espaciales y por ende el análisis espacial, están afectados por errores de diferentes fuentes y se introducen en las diversas fases de construcción de un SIG, como por ejemplo (Aronof, 1989):

- ◇ Recogida de datos.
- ◇ Almacenamiento.
- ◇ Salidas cartográficas.
- ◇ Captura de datos.
- ◇ Manipulación.
- ◇ Uso de los resultados.

Los proyectos SIG deben cumplir con determinados estándares⁸ de exactitud y precisión, tanto para los datos espaciales como para los no espaciales, que conviene ser establecidos desde el principio y formar parte de los metadatos⁹.

Durante el procesamiento de datos los errores se propagan a los resultados sobre todo en operaciones sucesivas con un explosivo efecto de cascada, dichos errores no solo comprenden a aquellos producto de la manipulación, sino el error en el sentido estadístico, que para su detección se requiere un conocimiento profundo de los modelos y estructura de los datos así como de los algoritmos, en lo que intervienen la calidad de los datos, la calidad del modelo y el modo en que los datos y los modelos interactúan (Burrough y McDonnell, 1998).

Sin embargo, en la práctica común de trabajo con los SIG son poco abordados y documentados los aspectos relacionados con la propagación de errores en la modelación numérica, así como los errores asociados a la muy común operación de superposición de mapas (*overlay*), a excepción de la literatura especializada que hace cada vez más hincapié en estos aspectos.

La propagación de errores en los modelos numéricos

En la teoría de propagación de errores existen dos maneras fundamentales de afrontar su estudio: la aproximación estadística y la aproximación analítica.

La primera se basa en la existencia de errores estadísticos en los datos y la tarea es entonces conocer el error asociado a un nuevo atributo $U = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ y la contribución de cada entrada A_i . Para ello se cuenta con diferentes medios, tales como: la estadística, la geoestadística, la validación mediante series de datos independientes y la simulación estocástica (Burrough y McDonnell, 1998), a la cual ya se hizo referencia.

⁸ Algunos ejemplos de estándares pueden verse en: [USGS Geospatial Data Standards](#) e [Information on the Spatial Data Transfer Standard](#).

⁹ Información sobre los datos.

En las fuentes de incertidumbre estadística se incluyen a los errores de medición y la variación espacial correlacionada que no puede ser explicada por los modelos físicos. Los desajustes en las estructuras de correlación espacial y temporal, así como el tamaño del soporte es uno de los mayores problemas cuando se combinan datos de diferentes fuentes.

En el acápite anterior se mostraron aspectos de la teoría geoestadística y la simulación estocástica condicional para datos interpolados, como parte de la aplicación de la teoría de propagación de errores en la estimación espacial, mediante el uso de la técnica de Monte Carlo.

Aproximación analítica

La aproximación analítica sigue la teoría estadística estándar de propagación de errores en análisis puntuales (cada entidad o celda) que no impliquen operaciones topológicas, *buffer* o ventanas móviles y puede ser hallada en diversos textos y publicaciones electrónicas¹⁰, aquí se sigue a Burrough y McDonnell (1998).

La teoría simple de propagación de errores expresada mediante ecuaciones diferenciales parciales, considera que para $u = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_i)$, donde todos los elementos a_i y sus errores asociados son aleatorios e independientes, la desviación estándar Su de u esta dada por:

$$Su = \left[\sum_{i=1}^j (\delta u / \delta a_i)^2 \cdot Sa_i^2 \right]^{1/2} \quad [1,12]$$

Y el error estándar SEu de u , con SEa_i como error estándar de a_i estará dado por:

$$SEu = \left[\sum_{i=1}^j (\delta u / \delta a_i)^2 \cdot SEa_i^2 \right]^{1/2} \quad [1,13]$$

Cuando existe correlación, otro término r_{ij} debe ser añadido para expresar el incremento del error debido a la correlación:

$$SEu = \left[\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j \{ \delta u / \delta a_i \cdot \delta u / \delta a_j \cdot SEa_i \cdot SEa_j \cdot r_{ij} \} \right] \quad [1,14]$$

De lo anterior se deducen las siguientes expresiones para el cálculo del error propagado a u :

En la adición o sustracción para variables no correlacionadas, $u = (\Sigma \pm a_i)$:

$$Su = \sqrt{\{ \sum Sa_i^2 \}} \quad [1,15]$$

¹⁰ http://ees2.geo.rpi.edu/gis/lectures/week8_lecture.htm,
<http://www.rit.edu/~vwlsps/uncertainties/Uncertaintiespart2.html>

Para dos variables correlacionadas a_1 y a_2 :

$$Su = \sqrt{\{Sa_1^2 + Sa_2^2 + 2Sa_1Sa_2.ra_1a_2\}} \quad [1,16]$$

En la multiplicación, división o potencia, $u = (a_1^c . a_2^d)$:

$$Su = \sqrt{\{c^2 . a_1^{2(c-1)} . a_2^{2d} . Sa_1^2 + d^2 . a_1^{2c} . a_2^{2(d-1)} . Sa_2^2\}} \quad [1.17]$$

A partir de la expresión anterior se aprecia que para el caso de una constante c , $u = (c . a_1)$, $c = 1$,

$$d = 1 \text{ y } Sa_j^2 = 0, \text{ por lo que: } Su = \sqrt{\{c^2 . Sa_1^2\}} \quad [1,18]$$

Para la potencia, donde C y c son constantes y a_i esta correlacionada con ella misma, tal que

$$u = Ca_1^c : \quad Su = \sqrt{\{C^2 . c^2 . a_1^{2(c-1)} . Sa_1^2\}} \quad [1,19]$$

Otras expresiones tales como logarítmicas y trigonométricas pueden verse en las fuentes citadas.

Es posible apreciar que la dimensión del error relativo cambia en dependencia de la operación que se realice. Así se tiene que el efecto de propagación del error en la adición es mínimo, mientras que en la sustracción su incremento es importante, sobre todo para variables de valores similares, de ahí que se pueden generalizar las siguientes reglas (Burrough y McDonnell, 1998):

- ◇ Evitar variables intercorrelacionadas, ◇ En su defecto multiplicar o dividir,
- ◇ Adicionar siempre que sea posible, ◇ Evitar la sustracción y la potenciación.

La superposición de mapas

Los errores derivados de la variabilidad espacial de los objetos cartografiados se materializa en que los polígonos no se corresponden realmente a unidades puras (Lagacherie, 1998), tal y como se declaran en la leyenda de los mapas, así como que generalmente no existe información sobre el grado de representatividad o pureza de las entidades cartográficas. Este tipo de problema cambia con el objeto cartografiado y es frecuente en los mapas de suelo y vegetación, e influye grandemente en los resultados de la modelación y el *overlay*, que representa una de las mayores fuentes de errores y pérdidas de información (Burrough y McDonnell, 1998).

En la operación de *overlay* (operador AND) ocurren errores tanto del tipo cartográfico como semántico (Lagacherie, 1998). El número de polígonos resultantes es más una función de la complejidad de los límites de los polígonos en los mapas involucrados que del número de polígonos de dichos mapas, debido a la formación de polígonos falsos, que es mayor en la medida de que los mapas que intervienen en la operación estén correlacionados. Esta operación es sensible al número de pasos, incrementándose el error de manera significativa.

1.2.7 Validación de la estimación puntual y espacial de la RCOS

El mejor método de estimación es aquel que minimiza la suma de los cuadrados de los residuos (Minasny *et al.*, 1999):

$$SCR = \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_i - Z_i)^2 \quad [1.20]$$

Donde: *SCR* – es la suma de cuadrados de los residuos; Z_i - valor real; \hat{Z}_i - valor estimado.

Por lo tanto la evaluación de un método de predicción se logra a través de índices calculados a partir del valor tomado como real Z_i y el estimado \hat{Z}_i en *N* sitios de validación.

Este método puede ser aplicado tanto a estimaciones de un modelo como a estimaciones espaciales (Ej. valores interpolados espacialmente). Su cálculo se realiza usualmente mediante una validación externa por la técnica conocida como “*jackknifing*” (Cressie, 1993), que consiste en utilizar una población de datos ajena a los procesados.

1.3 Potencial de los suelos para el secuestro de carbono, valoración económica

A propósito de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), las partes se manifestaron conscientes de la importancia de los sumideros y los depósitos naturales de gases con efecto invernadero (Espinosa *et al.*, 1999), los suelos fueron vistos entonces, como una promisoría vía para el secuestro de carbono, a través de los posibles cambios de uso de la tierra o la conservación del bosque, dado su gran potencial (Marland, 1988). Se estima que los ecosistemas terrestres pueden secuestrar hasta 50-75% de las pérdidas históricas (Lal, 1999). Dicho autor considera, que si se recuperan dos billones de hectáreas de suelos degradados, se anula el incremento anual del CO₂ atmosférico, secuestrándose 1.5 t/ha en suelos y vegetación, y que sólo el control global de la desertificación, tiene un potencial de 1-1.5 Gt C/año. Las tres principales estrategias para favorecer el secuestro de carbono son: (1) Aumentar la densidad del carbono del suelo, (2) Reducir la relación de descomposición y (3) Incorporar profundo el carbono en el suelo.

Izac (1997) expone los beneficios del manejo sostenible del carbono a diferentes escalas (Figura 5), en los que involucra la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la atenuación de los efectos del cambio climático.

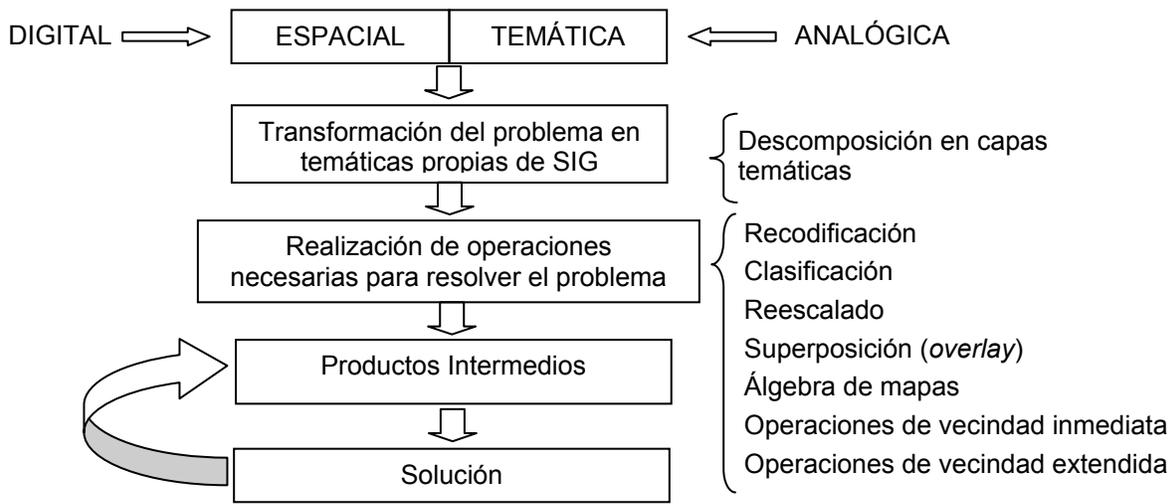


Figura 4. Esquema general de la conceptualización de un problema y su traducción en mapas y operaciones sobre mapas, que transforman los productos de entrada en productos que constituyen la solución de problemas en SIG.

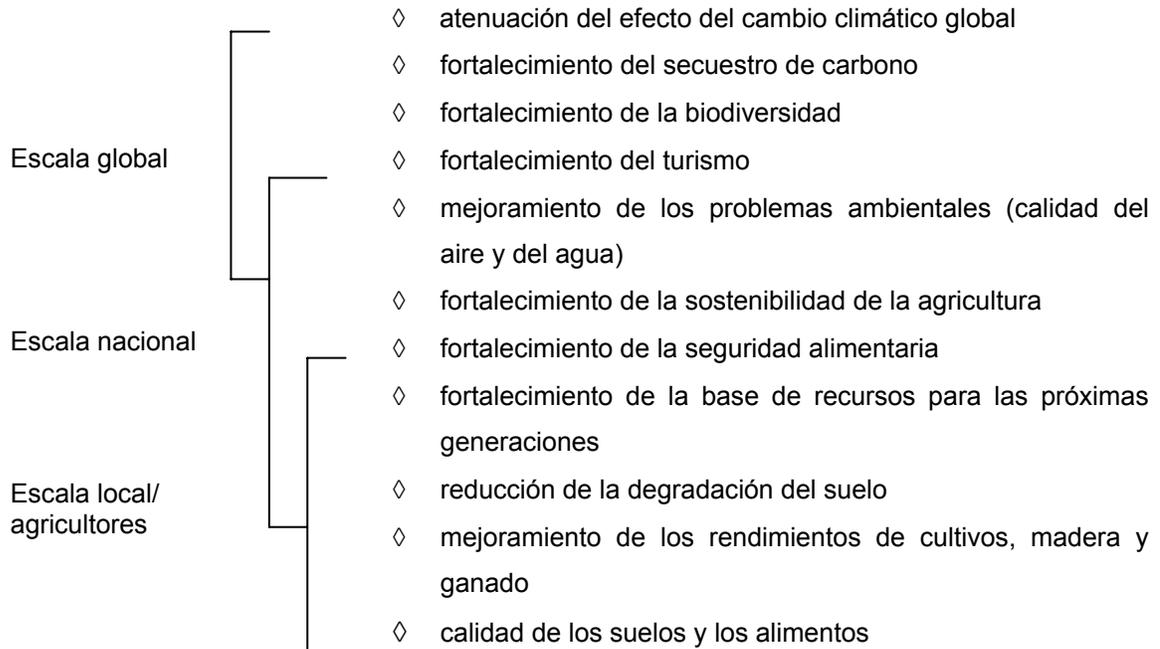


Figura 5. Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales (modificado de Izac, 1997).

Bajo estos principios son cada vez más frecuentes el impulso de proyectos con fines de secuestro de carbono, visto como un servicio ambiental (Espinosa *et al.*, 1999), enmarcado en estrategias nacionales de mitigación del cambio climático.

Países como Costa Rica, El Salvador, Guatemala, México¹¹ y otros, exponen experiencias en la aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), definido en el Protocolo de Kyoto (Cuellar *et al.*, 1999; Brenúgat, 1992)

Los estimados regionales del potencial de secuestro de carbono, es un aspecto crucial para el trazado de políticas de cambio de uso de la tierra y la implementación de proyectos sostenibles (Falloon *et al.*, 1998). Las experiencias más actuales en la estimación del potencial de secuestro de carbono, en las condiciones climáticas específicas de un escenario dado, se logra mediante el uso de modelos de simulación dinámica unido a bases de datos espaciales explícitas (Falloon *et al.*, 1998; Ponce-Hernández, 1999), debido a que están involucrados diferentes usos de la tierra actuales y potenciales, pudiéndose vincular a los aspectos económicos.

1.3.1 Valoración económica

El carbono se convirtió en un recurso comercial cuando a partir del Protocolo de Kyoto se propiciaron tres condiciones básicas: (a) el surgimiento de la demanda, (b) la autorización de la oferta a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y (c) incluir la actividad forestal. Este proceso tuvo su reafirmación en la cuarta Conferencia de las Partes realizada en Argentina (noviembre 1998), donde se fijó como plazo el año 2000 para dejar establecidos los mecanismos contemplados en el Protocolo, a saber: (1) Implementación Conjunta; (2) Comercio de Emisiones; y (3) el MDL ya citado. Por medio de este último, los países industrializados pueden adquirir reducciones de emisiones de CO₂ certificadas (CTO's, *Certified Tradable Offsets*), a través de proyectos que fijen, reduzcan o eviten emisiones, de esta manera se generó la necesidad de estimar el valor del carbono.

Van Hauwermeiren (1998) señala que la economía neoclásica estipula que la conmensurabilidad de los precios permite inferir una conmensurabilidad del valor; sin embargo, desde los presupuestos de la economía ecológica, o ciencia de la gestión de la sustentabilidad, este es un intento por comparar valores inconmensurables, dado que no hay una unidad común de medida,

¹¹ Servicios ambientales de recurso forestal. Gobierno Constitucional del Estado de Querétaro, Secretaría de Desarrollo Agropecuario, http://www.semarnat.gob.mx/queretaro/servicios_ambientales_actualizado.pdf.

por lo que el proceso de toma de decisiones debe basarse en evaluaciones multicriterios donde se pondere de manera distinta cada uno de los aspectos a tener en cuenta, de ahí la aun insuficiente bibliografía sobre contabilidad ambiental.

En relación al carbono, en el contexto de la agricultura y los servicios ambientales, la materia orgánica se reconoce como un indicador de la calidad y estado de conservación de los suelos (Kononova, 1981; Carter, 2002); su valoración, permite el establecimiento de políticas de preferencias en los territorios más afectados, para la aplicación de técnicas conservacionistas de manejo y uso de la tierra, que favorezcan el secuestro de carbono y con ello se contribuya a la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático (Ponce-Hernández, 1999).

El precio base establecido ha sido de 10–20 USD, a partir del costo de oportunidad (CO) del cambio en el uso del suelo de ganadería extensiva hacia el sector forestal (Cuellar *et al.*, 1999). El costo de oportunidad, cuando el bosque está establecido, se refiere a la principal amenaza de cambio de uso del suelo, pero no como venta sino como renta en el tiempo, en ambos casos se establece a partir del análisis del valor de depreciación del recurso suelo.

La rebaja por depreciación es una estimación del valor actual de pérdidas de ingresos futuros, debido al impacto de la actividad económica en la calidad del recurso y su capacidad productiva (Calfucura, 1998). Este autor resumió los métodos usados en la contabilidad de la depreciación del recurso suelo basado en el estudio de Repetto *et al.* (1989):

- a. Cálculo de la depreciación del suelo como disminución de la renta.
- b. Cálculo por el método de costo de reposición del suelo.

El primero, considera que el valor del suelo como activo natural debe corresponder al valor presente de las rentas futuras y que la depreciación del suelo debido a la erosión implica una disminución de los ingresos netos.

Se propone para el cálculo la siguiente expresión:

$$VDS = (R * p_R - C * p_c) / i \quad [1,21]$$

Donde: VDS – Valor de depreciación del suelo.

R – Ingresos originales producidos por el suelo; p_R – pérdida porcentual de los ingresos debido a la erosión; C – costos de operación; p_c – cambio en los costos de operación e i la tasa de interés.

El segundo caso tiene en cuenta el costo que implica restituirle al suelo las propiedades o elementos perdidos por efecto de procesos degradativos como la erosión. Para ello, una de las vías es estimar económicamente el valor actual de los fertilizantes comerciales necesarios para restablecer dichos elementos o propiedades, para lo cual Repetto *et al.* (1989) proponen la siguiente ecuación:

$$VDS = [(CN_{tot} - CN_{tol}) (f_a) (P_f + C_f)] \quad [1,22]$$

Donde: CN_{tot} – cantidad total de nutrientes perdidos; CN_{tol} - pérdida total tolerable; f_a – factor de aprovechamiento de los fertilizantes; P_f – precio de los fertilizantes y C_f – costo de aplicación de una unidad de fertilizante.

Este mismo principio puede aplicarse a la pérdida de carbono, lo que constituye una generalización a otros procesos de degradación. El cálculo del VDS se ha aplicado a la pérdida de materia orgánica (Monederos, 2000) como una manera de establecer un elemento común comparativo, a partir del valor y el costo de aplicación de un material orgánico de referencia.

Otro elemento en la estimación de los costos de secuestro de carbono es el precio internacional del carbono (pci) o cotización por tonelada que corra en los mercados internacionales, para lo cual se estima el costo por hectárea, que está dado por el potencial de secuestro en un área específica, según:

$$pci = (ct \times ps) / Nh \quad [1.23]$$

Donde: pci – precio internacional del carbono; ct – costo de la tonelada métrica; ps – potencial de secuestro de carbono y Nh – número de hectáreas.

En las transacciones de las comunidades indígenas de Chiapas, México, con la Federación Internacional de Automovilistas de Italia¹², se les añadió a dichos costos la suma de varios componentes, entre los que estaba el precio por concepto de infiltración de agua (pai), el costo de protección (cp) y el costo de reforestación y reproducción del bosque (crr), a lo que denominaron “Costo Acumulado por Captura e Infiltración (CACI).

La cuantificación de los costos de secuestro de carbono sirven para hacer valoraciones económicas del recurso, pero no deben ser determinantes, sino como un elemento más en un análisis multicriterio participativo, que involucre a todos los actuantes e implicados, en la toma de decisiones.

¹² Gobierno Constitucional del Estado de Querétaro, Secretaría de Desarrollo Agropecuario http://www.semarnat.gob.mx/queretaro/servicios_ambientales_actualizado.pdf

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA RESERVA DE CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS MINERALES

2.1 El objeto de estudio

Se determina la reserva de carbono orgánico de los suelos minerales (**RCOS**) a partir del carbono orgánico de los suelos (**COS**) extraído por los métodos analíticos de combustión húmeda de Tiurin y Walkley - Black., comúnmente usados en los laboratorios de Cuba.

Los valores expresados como porcentaje de materia orgánica (MO), se convirtieron a carbono, según el criterio de Orlov *et al.* (1969): $\%COS = \%MO/1.724$ [2.1]

En el análisis particular de cada perfil no se tuvo en cuenta la capa de humus mor y de hojarasca, solamente el carbono acumulado en el suelo en forma de humus verdadero del tipo mull o moder.

2.1.1 Método de Tiurin

El método de Tiurin (Belchikova, 1965; Kaurichev *et al.*, 1984) es usado en las determinaciones de **COS** realizadas en los laboratorios del Instituto de Suelos. Se basa en la oxidación del humus con disolución de bicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 0.4 N, preparada con ácido sulfúrico diluido en agua destilada a una proporción 1:1, la digestión se realiza en estado de ebullición moderada. Se valora con sal de Mohr 0.2 N utilizando como indicador la difenilamina.

2.1.2 Método Walkley-Black

El método de Walkley-Black (Jackson, 1970), es el usado en las determinaciones de **COS** realizadas en los laboratorios del MINAGRI y a diferencia del de Tiurin no usa calor externo en la oxidación de la materia orgánica del suelo.

2.1.3 Uso de información de COS en el cálculo de la RCOS sin atender al método analítico de laboratorio empleado

De acuerdo a la descripción anterior de los métodos más frecuentemente usados en Cuba para la determinación del carbono, se deduce que el método de Walkley – Black subestima el contenido de **COS** al no usar calor externo en la oxidación de la MO, por otra parte, en muestras de suelos

salinos o salinizados ocurre lo contrario, se sobre estima, al no emplear AgNO_3 para bloquear el anión Cl^- . La diferencia entre ambos métodos puede estar entre el 5-10% (Martínez, comunicación personal), lo cual se halla en el rango del error de la propia determinación, por lo que para los objetivos del estudio no es necesario discriminar la población de datos por el método analítico usado en la determinación del *COS*.

En la Tabla 5 se muestra la proporción de muestras analizadas por uno y otro método de acuerdo al origen de los datos utilizados.

2.2 Marco geográfico de la investigación

La ubicación de la Isla de Cuba y las áreas de referencia para el estudio se muestran en la Figura 6. El estudio abarca la totalidad de los suelos minerales de Cuba; excluyendo solamente del territorio nacional emergido, los espacios ocupados por humedales, los pueblos y los cayos.

De acuerdo con el objetivo propuesto de investigar diferentes procedimientos de generalización espacial, que requieren grandes volúmenes de información en formato digital, surge la necesidad de una segunda área que asegurara la manifestación de diferentes condiciones edafológicas. Para ello, se seleccionó una amplia región de la provincia de La Habana. El tratamiento y manipulación de la información en ambas regiones es independiente.

2.3 Diseño de la metodología general de investigación

La determinación de las reservas de cualquier elemento en un territorio, comprende una diversidad de tareas difíciles de agrupar con una denominación común, para el caso de la *RCOS*, se separan las anotaciones metodológicas en dos secciones principales:

1. Estimación puntual, la cual se entiende como aquella que se determina a partir de la información de un perfil u observación de barrena.
2. Generalización espacial, donde se le presta atención a los aspectos espaciales relativos al cálculo de la reserva en un área.

2.3.1 Métodos Generales

La Tabla 6 expone una clasificación de los métodos generales usados y el área de influencia de acuerdo a la división propuesta anteriormente.



Figura 6. Esquema de referencia y ubicación de las áreas de estudio.

2.4 Metodología propuesta para la determinación puntual de la *RCOS*

La determinación tradicional de la reserva del carbono orgánico del suelo (*RCOS*) por área a partir de la información brindada por un perfil de suelo completamente caracterizado por las variables de interés y en todos sus horizontes, suele expresarse en toneladas por hectárea ($t \cdot ha^{-1}$) o en kilogramos por metro cuadrado ($kg \cdot m^{-2}$); $1 t \cdot ha^{-1} C = 0.1 kg \cdot m^{-2} C$. La forma de cálculo es la siguiente:

$$RCOS = \sum_{i=1}^{i=n} COS(i) * d_s(i) * h(i) * (1 - I(i)) \quad [2.2]$$

Donde:

- ◇ *RCOS* - Reserva de Carbono Orgánico del Suelo ($t \cdot ha^{-1}$).
- ◇ *COS(i)* - es el contenido de carbono orgánico de cada capa u horizonte de suelo considerada, expresada en porcentaje del peso seco al aire.
- ◇ *d_s(i)*- es la densidad del suelo en el horizonte *i*, expresado en $Mg \cdot m^{-3}$.
- ◇ *h(i)* - es la potencia del horizonte *i*, expresado en cm.
- ◇ *I(i)* - es el contenido de inclusiones, expresado en partes de la unidad.

Para el cálculo de la *RCOS* puntual (perfiles de suelos) se diseñó la metodología que se esquematiza en la Figura 7, donde se representa el flujo de información desde la adquisición de los datos hasta el cálculo de la Tabla General de Reserva, nombre dado a la tabla que almacenará los valores medios de *RCOS* por cada serie de suelo identificada en las fuentes de información. El esquema consta de tres procedimientos principales:

- ◇ Preparación y evaluación de la información a partir de las fuentes compiladas.
- ◇ El cálculo de la *RCOS* en los perfiles de suelo a partir de modelos de distribución vertical de carbono y la construcción de curvas patrones.
- ◇ Construcción de la Tabla General de Reserva.

A partir de la información cartográfica se prepararon las bases de datos espaciales y de atributos diseñadas al efecto que forman parte del SIG, la información de perfiles compilada se usó en la confección de las curvas patrones y la Tabla General de Reserva. Esta tabla y los datos de *RCOS* se emplean en la metodología para la generalización espacial implementada y en estudios de la variabilidad espacial del *COS* y la *RCOS*.

2.4.1 Información cartográfica utilizada y escalas de trabajo

La fuente básica de información edafológica la constituyó el Mapa Genético de los Suelos de Cuba, a escala 1:250 000 (Instituto de Suelos, 1974), debido a:

- ◇ Disponibilidad.
- ◇ Escala.
- ◇ Capacidad de predicción de la clasificación de suelos empleada.

Otros mapas fueron desechados debido a su baja disponibilidad y demanda de recursos para su digitalización.

Finalmente el mapa Suelos 500 000, se usó para realizar los resúmenes estadísticos y el análisis de las reservas por Tipos de Suelos de acuerdo a la clasificación más actual. Las bases cartográficas utilizadas se relacionan en la Tabla 7.

Todo el levantamiento de información para el cálculo de las reservas de carbono de los suelos de Cuba se realizó sobre una escala de trabajo de 1:250 000, tomándose como escala definitiva de presentación de los resultados la de 1:500 000, con el fin de reducir a la mitad cualquier error cartográfico.

2.4.1.1 Procedimiento de digitalización

El Mapa de Suelos escala 1:250 000 (Instituto de Suelos, 1974), se digitalizó de acuerdo al modelo de representación espacial “*raster*”, para ello se cuadrículó cada hoja cartográfica a dos niveles, el primero en cuadrículas de 0° 05' 00” y éstas a su vez en 16 celdas en un arreglo de 4×4 a una resolución espacial de 0° 01' 15” (≈ 0.9 cm en el mapa y 2250 m en el terreno, área aproximada de la celda: 506.25 ha). El mapa digital resultante con un total de 36 080 celdas (Figura 8A), equivale a una escala vectorial de 1:355 756, tomando como delineación legible óptima (DLO) = 1.6 cm² y un área mínima de decisión (AMD) de 4 veces el área de la celda en ha (Forbes *et al.*, 1982), de acuerdo a:

$$\text{Factor de Escala } mm^{-1} = \sqrt{AMD \text{ ha} \times 0.625 \text{ cm}^2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ ha}^{-1}} \quad [2.3]$$

Del área de cada celda delimitada en el mapa se tomó la descripción de hasta cuatro componentes con representación espacial, utilizando para el cálculo de los porcentajes de ocupación una lámina de acetato milimetrada.

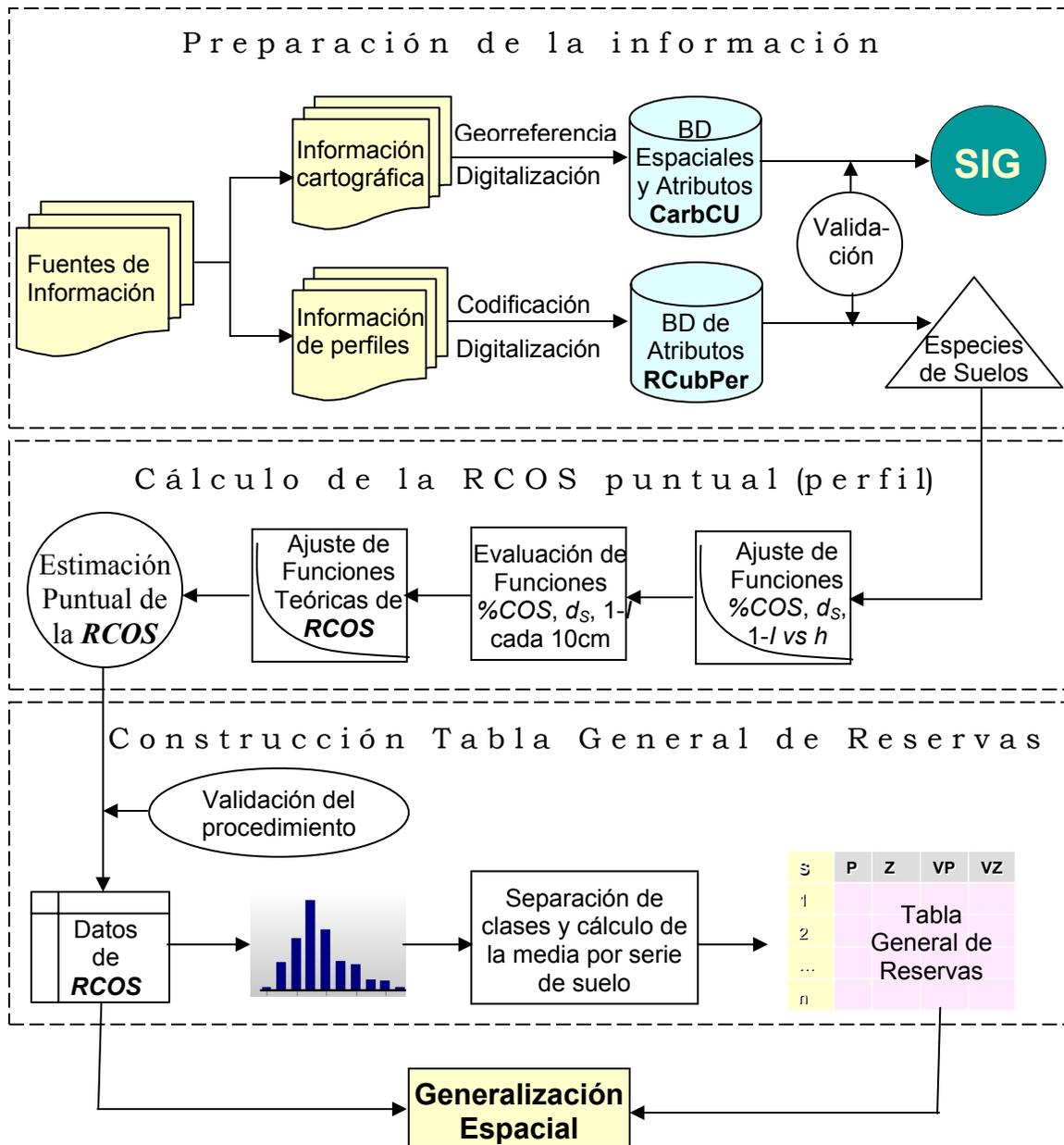


Figura 7. Flujo de información en el procedimiento empleado para la creación de curvas patrón usadas en la estimación puntual de la reserva de carbono.

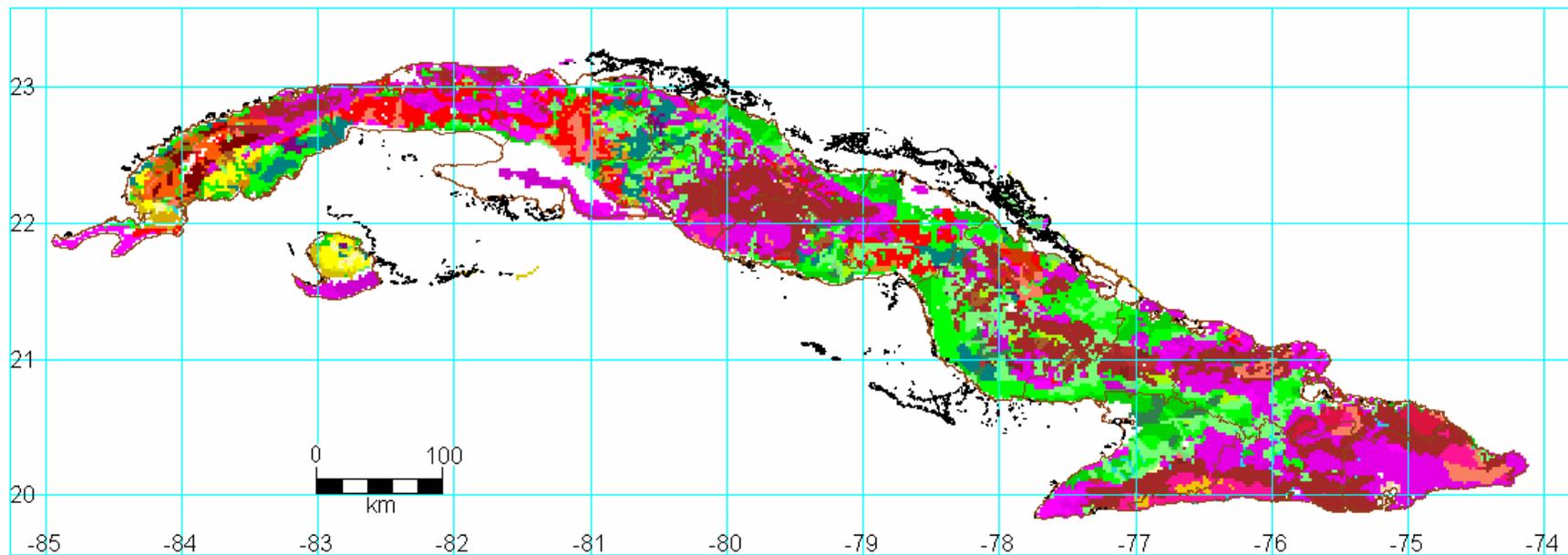


Figura 8A. Subgrupos de Suelos según el Mapa de Suelos de Cuba escala 1:250 000 digitalizado a una resolución de 00°01'15'', se presenta la componente de mayor porcentaje de ocupación en la celda (SUELO1).