

EL ROL DEL CARBONO EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS

Alejandro Morón*

INTRODUCCION

En los sistemas productivos agropecuarios existen tres grandes *pools* de carbono (C): carbono en la atmósfera, carbono en vegetales y animales, y carbono en la materia orgánica del suelo. En la figura 1 Ladd & Martin (1984) esquematizaron los diferentes flujos de carbono en un ecosistema de pasturas. El carbono presente en la atmósfera como CO₂ (anhídrido

carbónico) es reducido por las plantas en el proceso de fotosíntesis. El carbono de los residuos de plantas y animales cumple con la función de servir de fuente de energía y constitución del protoplasma de la biomasa microbiana del suelo. Durante el proceso de respiración aeróbica de plantas, animales y microorganismos el CO₂ es uno de los productos finales, retornando así a la atmósfera. En condiciones normales, durante la formación del suelo se produce la acumula-

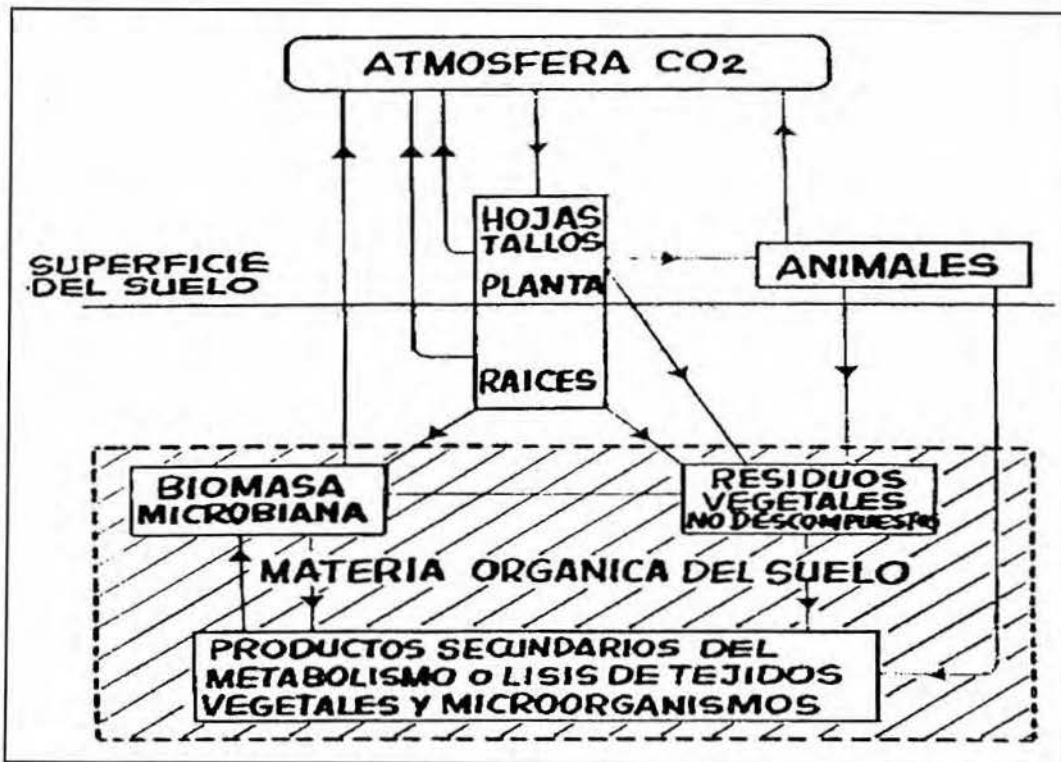


Figura 1. Flujo de carbono bajo un sistema de pasturas.

* Ing. Agr., Dr., Suelos, INIA La Estanzuela.

ción de materia orgánica hasta un determinado nivel. La acumulación de materia orgánica en el suelo se debe a la resistencia a la descomposición que ofrecen algunos compuestos derivados del metabolismo microbiano y de la lisis de tejidos vegetales y microorganismos. La materia orgánica del suelo determina una serie de características productivas de los suelos y es evaluada como uno de los factores más importantes en la sustentabilidad de los sistemas productivos agropecuarios.

El objetivo del presente artículo es analizar algunos aspectos del ciclo del carbono en los sistemas de producción agropecuarios.

1. EL CARBONO EN LOS SERES VIVOS

El carbono es un elemento esencial para el desarrollo de la vida. Forma parte de todos los compuestos orgánicos. En términos generales, el análisis elemental base materia seca, desde una bacteria hasta un animal pasando por los vegetales muestra que el porcentaje del carbono oscila entre un 40 y 50%. (Jenkinson, 1981). El carbono en combinación con pocos elementos, oxígeno (O), hidrógeno (H), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), forma miles de compuestos conocidos. La capacidad que tienen los átomos de carbono para formar enlaces covalentes con átomos de otros elementos o con otros átomos de carbono es de gran importancia en los seres vivos. La formación de enlaces covalentes entre átomos de carbono da lugar a la formación de grandes moléculas estables.

La configuración de las grandes moléculas orgánicas es generalmente función de la disposición de los átomos de carbono que constituyen el esqueleto o columna de la molécula. A su vez, muchas de las propiedades y funciones vitales de las moléculas orgánicas son función de su configuración.

2) EL CARBONO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Existe un interés creciente en el ciclo del carbono que trasciende el interés agronó-

mico. Los estudios sobre cambio climático a nivel mundial tienen en el ciclo del carbono uno de los factores de mayor importancia. El CO_2 (anhídrido carbónico) que se encuentra en la atmósfera está relacionado con el mantenimiento de la temperatura de la tierra. Aumentos en su concentración provocan aumentos de temperatura a través del fenómeno conocido como efecto invernadero. La concentración de CO_2 en la atmósfera se encuentra aumentando desde fines del siglo pasado hasta nuestros días. Este aumento es particularmente destacado a partir de 1950, calculándose actualmente una ganancia atmosférica neta de 3×10^9 toneladas de carbono anuales (Houghton & Woodwell, 1989). Existen dos aspectos fundamentales que inciden en el aumento de la concentración de CO_2 : la utilización de combustibles fósiles y el uso del suelo. Dentro del uso del suelo se destaca la deforestación. Según Houghton & Woodwell (1989) la incidencia en el incremento de anhídrido carbónico en la atmósfera de los combustibles fósiles respecto a uso del suelo es de 2.5 a 1 respectivamente.

3) LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica del suelo son todos los compuestos orgánicos vivos o muertos que se encuentren en el suelo (Theng *et al.*, 1989; Jenkinson, 1989). Actualmente se acepta que el concepto de materia orgánica es más amplio que el de humus. Humus queda restringido a una mezcla de sustancias orgánicas de alto peso molecular, con propiedades coloidales, de color marrón a negro, en las cuales no se reconoce al microscopio ninguna organización celular, el cual es sintetizado por reacciones en las que intervienen organismos vivos (Stevenson, 1982; Oades, 1989). En forma más pragmática el TSBF (Anderson & Ingram, 1993) define a la materia orgánica del suelo como todo material orgánico que pasa por un tamiz de 2 mm.

El principal constituyente de la materia orgánica del suelo es el carbono, variando su concentración desde el 48 a 58 % de su peso (Nelson & Sommers, 1982). El factor

1.72 para transformar % C orgánico en % de materia orgánica asume una concentración de C en la materia orgánica de 58%. Según Stevenson (1986), en promedio la relación C/N/P/S en la materia orgánica para diferentes regiones del mundo es 140/10/1.3/1.3.

La materia orgánica está relacionada con diversas propiedades del suelo. A continuación se describen las más importantes:

a) Físicas

- * **Densidad aparente (g/cm^3):** la materia orgánica del suelo disminuye la densidad aparente en forma directa e indirecta. Directamente debido al hecho de poseer una densidad real entre 0.6 y 1 g/cm^3 frente a una densidad real promedio del material mineral de 2.65 g/cm^3 . Indirectamente por vía de aumentar la agregación y en consecuencia el porcentaje de poros del suelo con aire.
- * **Estructura:** la materia orgánica mejora la estructura del suelo como resultado de la formación de agregados. La materia orgánica humificada junto con los minerales de arcilla son los dos agentes cementantes más importantes en la formación de agregados.
- * **Aireación y drenaje:** la formación de agregados y la correspondiente mejora en la estructura se traduce en incrementos en la aireación y drenaje interno del suelo.
- * **Retención de agua:** la materia orgánica aumenta indirecta y directamente la capacidad de almacenar agua del suelo. Indirectamente por permitir una mayor infiltración en el perfil del suelo. Directamente por poseer la capacidad de retener agua. La materia orgánica a medida que sufre los procesos de humificación aumenta su capacidad de retener agua llegando en promedio a retener un 160% de su peso.
- * **Consistencia:** la consistencia del suelo (duro, friable, plástico) cambia según el contenido de agua del suelo. El estado friable es el estado ideal para efectuar operaciones de laboreo. El incremento

en el contenido de materia orgánica determina que el contenido de agua del suelo al cual el suelo cambia del estado friable al estado plástico es mayor.

b) Biológicas y químicas

- * **Actividad biológica:** la materia orgánica humificada sirve como una fuente de energía a los macro y microorganismos. Existe una asociación entre el contenido de materia orgánica humificada y el número de macro y microorganismos.
- * **Fuente de nutrientes:** la materia orgánica es una importante fuente de nutrientes (N,P,S). A través de los procesos de mineralización, efectuados fundamentalmente por la biomasa microbiana, son transformados de formas orgánicas a formas inorgánicas (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) utilizables por las plantas.
- * **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** la materia orgánica humificada tienen algunos grupos funcionales (carboxilo, R-COOH; fenólico, R-OH) que a los pH operativos del suelo se encuentran parcialmente disociados. La disociación del hidrogenión (H^+) ligado al oxígeno determina cargas negativas en la materia orgánica humificada, lo cual genera la capacidad de adsorber electrostáticamente los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . Los iones anteriormente mencionados se encuentran en equilibrio con la solución del suelo desde donde son tomados por las plantas.
- * **Poder buffer:** es definido como la capacidad de resistir los cambios de pH del suelo. La materia orgánica humificada actúa como un par *buffer* (ácido débil-sal poco disociada de ácido débil). Cuanto mayor sea el contenido de materia orgánica de un suelo mayor será su capacidad de intercambio catiónico (CIC) y por tanto mayor será su capacidad de resistir los cambios de pH. Generalmente los suelos arenosos presentan menor poder *buffer* que los suelos arcillosos.
- * **Combinación con moléculas orgánicas:** la experimentación ha demostrado re-

petidamente que la cantidad de pesticidas utilizada (herbicidas, fungicidas, insecticidas) es fuertemente influenciada por el contenido de materia orgánica del suelo. En general el mayor contenido de materia orgánica determina que mayores cantidades de pesticidas sean requeridas.

En condiciones naturales el nivel de materia orgánica de un suelo es función del clima, vegetación, topografía, material madre y tiempo. El uso y manejo del suelo tiene importantes efectos, negativos o positivos, en el contenido de materia orgánica del suelo (Jackman, 1964; Jenkinson, 1988; Dalal & Mayer, 1986; Johnston, 1991; Cambardella & Elliott, 1992; Díaz Roselló, 1992).

Generalmente, cuando un suelo es cultivado en forma convencional el nivel de materia orgánica del suelo disminuye debido a que una parte de la producción es removida, la erosión se incrementa y se aceleran los procesos biológicos de mineralización. Tendencias inversas, incrementos en la materia orgánica, fueron observadas en Nueva Zelanda cuando se sustituyó la vegetación nativa (bosque) por pasturas de leguminosas y gramíneas fertilizadas (Jackman, 1964). Diversos trabajos han demostrado que los sistemas de cero laboreo comparados con los de laboreo convencional incrementan el contenido de carbono del suelo especialmente en los primeros centímetros del perfil del suelo (Rasmussen & Collins, 1991). En INIA La Estanzuela, los resultados de un experimento de largo plazo con distintos sistemas de rotaciones de cultivos y pasturas ha demostrado cambios importantes en el contenido de carbono orgánico (Díaz Roselló, 1992; Baethgen *et al.*, 1994; Morón, 1994), en el tamaño de la biomasa microbiana (García & Morón, 1993) y en la actividad de la biomasa microbiana (Morón & Baethgen, 1994) a favor de los sistemas que incluyen pasturas en las rotaciones.

En forma genérica, para un tipo de suelo determinado, cada sistema de producción tiene un determinado nivel de equilibrio para el contenido de materia orgánica. Cole *et al.*

(1987) discuten y ejemplifican este concepto. El balance de carbono es la diferencia entre las entradas (rastros, raíces, exudados radiculares) menos las salidas (erosión, mineralización, retiro en productos). En la figura 2 se observa un modelo simple, de dos compartimientos, de la dinámica del carbono en el suelo (Jenkinson, 1988).

Revisiones recientes muestran claramente la relación positiva entre la cantidad de residuos entrados al suelo y el nivel de materia orgánica (Rasmussen & Collins, 1991; Paustian *et al.*, 1995). Es ampliamente aceptado que los productos de la degradación de la lignina y compuestos nitrogenados son los mayores constituyentes de la materia orgánica humificada y estable del suelo (Paustian *et al.*, 1995). La entrada de residuos con alta concentración de lignina y la adición de nitrógeno puede ser una opción de manejo que conduzca al incremento del carbono del suelo (Sowden & Atkinson, 1968; Paustian *et al.*, 1992).

FAO (1989) definió la agricultura sostenible como el correcto manejo de los recursos de la agricultura para satisfacer las necesidades humanas mientras se mantiene o aumenta la calidad del medio ambiente y se conservan los recursos naturales.

Diversos autores (Swift & Woome, 1994; Lefroy & Blair, 1994; Pankhurst, 1994) han propuesto índices de sustentabilidad basados en determinaciones de la materia orgánica: materia orgánica total, relación materia orgánica total/materia orgánica total en condiciones indisturbadas, biomasa microbiana, relación biomasa microbiana/materia orgánica total, materia orgánica lábil, relación materia orgánica lábil/materia orgánica total, capacidad de mineralizar nitrógeno, etc.

No existen dudas que un mismo suelo con mayor contenido de materia orgánica tiene un potencial productivo mayor. No obstante, debe reconocerse que por lo menos parte de los roles de la materia orgánica del suelo pueden ser sustituidos por prácticas agrícolas: el suministro de nutrientes por fertilizantes, el régimen de agua por riego, la acidez por el uso de cal, etc. Pero

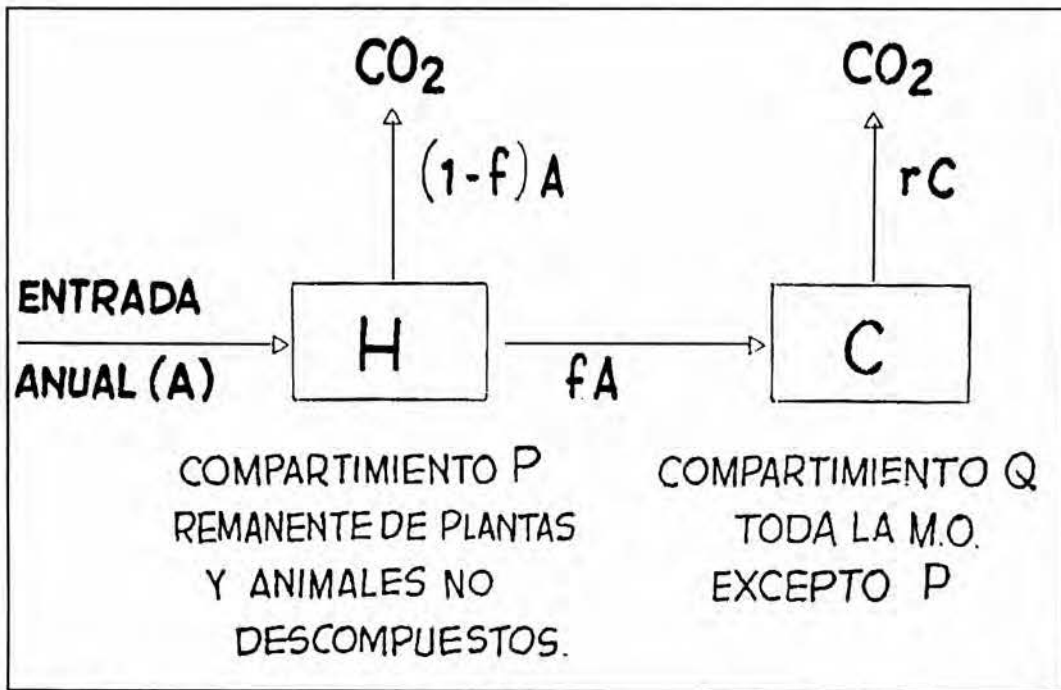


Figura 2. Modelo del ciclo del carbono en el suelo. La fracción de A que entra al compartimiento Q cada año es f. H y C son las cantidades de carbono orgánico en los compartimientos P y Q respectivamente, r es la fracción de C descompuesta cada año. (Jenkinson, 1988).

estas prácticas requieren un uso de energía suministrada por combustibles fósiles no siempre posible. Entre 1843 y 1856 en la Estación Experimental de Rothamsted en Inglaterra J.B. Lawes y J.H. Gilbert comenzaron los ensayos de manejo de suelo más antiguos del mundo hoy existentes. Estos experimentos han acumulado el efecto de distintos manejos que han provocado grandes cambios en el contenido de materia orgánica del suelo. Hasta hace pocas décadas, las diferentes concentraciones de materia orgánica en el suelo obtenidas por los diferentes tratamientos, presentaban pequeños efectos en el rendimiento de los cultivos, especialmente si la fertilización nitrogenada era realizada correctamente. Sin embargo, en los últimos años el rendimiento potencial de muchos cultivos ha aumentado notoriamente debido al uso de las nuevas variedades y al uso de agroquímicos que protegen ese potencial. Se ha demostrado que las nuevas variedades de altos

rendimientos no expresan todo su potencial con elevadas fertilizaciones en suelos con bajo contenido de materia orgánica (Johnston, 1986, 1991).

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, J.M. & INGRAM, J.S.I. ed. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods. Wallingford, Oxon, CAB International.

BAETHGEN, W.E.; MORON, A.; DIAZ-ROSELLO, R.M. 1994. Modeling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems of SW Uruguay. Transactions 15th World Congress of Soil Science (Acapulco, Mexico). Volume 9:supplement p.300-301.

CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOTT, E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal 57: 512-516.

- COLE, C.V.; WILLIAMS, J.; SHAFER, M.; HANSON, J.** 1987. Nutrient and organic matter as components of agricultural production systems models. In: Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Proceedings. Madison, SSSA. Special Publication N° 19. p. 147-166.
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J.** 1986. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereals yields. *Australian Journal of Soil Research* 24: 265-279.
- DIAZ-ROSELLO, R.** 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. In: Morón, A.; Baethgen, W., ed. *Rev. INIA Investigaciones Agronómicas*. 1(1):103-110.
- FAO.** 1989. Sustainable Agricultural Production: Implication for International Agricultural Research. Technical Advisory Committee, CGIAR. FAO Research and Technical Paper N°4 Rome, Italy.
- GARCIA, A. & MORON, A.** 1993. Studies on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in three crop rotation systems. *Proceedings of the XVII International Grassland Congress (New Zealand)* p.1577-1579.
- HOUGHTON, R.A. & WOODWELL, G.M.** 1989. Cambio climático global. *Investig. y Ciencia* (153): 8-17.
- JACKMAN, R.H.** 1964. Accumulation of organic matter in some New Zealand soils under permanent pasture. I- Patterns of organic carbon, nitrogen, sulphur, and phosphorus. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 7:445-471.
- JENKINSON, D.S.** 1981. The fate of plant and animal residues in soil. In: Greenland, D.J. & Hayes, M.H.B., ed. *The chemistry of soil processes*. J. Wiley & Sons, Cap 9 p.505-561.
- JENKINSON, D.S.** 1988. Soil organic matter and its dynamics. In: Alan Wild, ed. *Russell's soil conditions and plant growth*. 11th ed. Harlow, Essex, U.K. p.564-607.
- JOHNSTON, A.E.** 1986. Soil organic matter, effects on soils and crops. *Soil Use and Management* V2(3):97-105.
- JOHNSTON, A.E.** 1991. Soil fertility and soil organic matter. In: Wilson, W.S., ed. *Advances in soil organic matter research: the impact on agriculture and the environment*. Proceedings of a Joint Symposium (3-4 Sep. 1990, Essex, UK). Cambridge, The Royal Society of Chemistry. p.299-314.
- LADD, J.N. & MARTIN, J.K.** 1984. Soil organic matter studies. In: L'Annunziata, M.F. & Legg, J.O., ed. *Isotopes and radiation in agricultural sciences*. Academic Press, V1 Cap 3 p.67-98.
- LEFROY, R.D.B. & BLAIR, G.J.** 1994. The dynamics of soil organic matter changes resulting from cropping. *Transactions 15th World Congress of Soil Science (Acapulco, Mexico)*. Volume 9:supplement p.235-245.
- MORON, A.** 1994. La materia orgánica del suelo en los sistemas productivos. In: Manejo y fertilidad de suelos. Serie técnica 42 INIA. p. 5-10.
- MORON, A. & BAETHGEN, W.** 1994. Soil organic matter mineralization in four cropping systems. *Transactions 15th World Congress of Soil Science (Acapulco, Mexico)*. Volume 9:supplement p.298-299.
- ELSON, D.W. & SOMMERS, L.E.** 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., ed. *Methods of soil analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. Second Edition ASA-SSSA. Cap 29 p. 539-579.
- OADES, J.M.** 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. In: Dixon, J.B. & Weed, S.B., ed. *Minerals in soil environments*. Second Edition. N°1 SSSA Book Series. Cap 3 p.89-159.
- PANKHURST, C.E.** 1994. Biological indicators of soil health and sustainable productivity. In: Greenland, D.J. & Szabolcs, I., ed. *Soil resilience and sustainable land use*. CAB International. Cap 20 p.331-351.
- PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J., PERSSON, J.** 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and N-fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal* 56:476-488.
- PAUSTIAN, K.; ROBERTSON, G.P.; ELLIOTT, E.** 1995. Management impacts on carbon storage and gas fluxes (CO₂, CH₄) in mid-latitude cropland ecosystems. In: Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E.; Stewart, B.A., ed.

Soil Management and Greenhouse Effect. *Advances in Soil Science*, p. 69-83.

RASMUSSEN, P.E. & COLLINS, H.P. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy* 45:93-134.

SOWDEN, F.J. & ATKINSON, H.J. 1968. Effect of long-term annual additions of various organic amendments on organic matter of a clay and a sand. *Canadian Journal of Soil Science* 48:323-330.

STEVENSON, F.J. 1982. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. New York, Wiley. 443 p.

STEVENSON, F.J. 1986. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. New York, Wiley. 380 p.

SWIFT, M.J. & WOOMER, M.J. 1993. Organic matter and the sustainability of agricultural systems: Definition and measurement. In: Mulongoy, K. & Merckx, R., ed. *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*. New York, Wiley. p. 3-18.

THENG, B.K.G.; TATE, K.R.; SOLLINS, P. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils, In: Coleman, D.C.; Oades, J.M.; Uehara, G., ed. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu, Hawaii, NifTAL Project. p5-32.