



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Diagnóstico del efecto de diferentes usos del
suelo en el almacenamiento del carbono del
piedemonte amazónico y simulación de
escenarios alternativos**

María del Pilar Hurtado Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados
Doctorado en Ciencias Agrarias
Palmira, Colombia
2019

Diagnóstico del efecto de diferentes usos del suelo en el almacenamiento del carbono del piedemonte amazónico y simulación de escenarios alternativos

María del Pilar Hurtado Sánchez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctora en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D., Patrick Lavelle

Codirectora:

Ph.D., Elena Velásquez

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados

Doctorado en Ciencias Agrarias

Palmira, Colombia

2019

Resumen

La conservación de los bosques existentes, es una condición necesaria para el mantenimiento del calentamiento global dentro del límite deseado de 2°C. En el Piedemonte amazónico Colombiano, la principal actividad económica es la ganadería de doble propósito, que genera ingresos por venta de leche y carne. No obstante, el impacto de altas precipitaciones sobre suelos mal cubiertos, el manejo inadecuado de las praderas con presiones altas de pastoreo y la utilización de áreas no aptas para la ganadería, entre otros crean compactación y erosión de los suelos.

El propósito de este trabajo fue establecer el impacto de la Amazonia deforestada sobre el ciclo global de C, analizando su dinámica en tres sistemas de uso del suelo derivados del bosque inicial en el Departamento de Caquetá para comparar sus impactos. Se escogieron un Sistema Convencional – derivado de un bosque talado hace 80 años (Pastos nativos, leguminosas y malezas), un Sistema Silvopastoril – derivado de un bosque talado hace 60 años (Diversidad de Forrajes) y un Sistema Agroforestal – de 20 a 30 años con cultivos de (Caucho, Copoazú y Arazá). Se determinó en cada sistema, el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea (ecuaciones alométricas), el suelo y los agregados, la estabilidad y contenido de la materia orgánica (Isótopos Estables), con el fin de conocer el efecto en la dinámica de la materia orgánica por la alteración del bosque nativo e identificar prácticas agrícolas sostenibles que contribuyan a un mejoramiento en la calidad del suelo y en la mitigación del calentamiento global.

Las pasturas, exhibieron los menores valores promedio de almacenamiento de carbono en el suelo (0 a 30 cm) de 46,11 ton C/ha mientras en los sistemas agroforestales se encontraron niveles mayores de 52,83 ton C/ha. Por otra parte en la biomasa aérea, los niveles hallados fueron de 108,04, 48,80 y 25,77 Mg C/ha para los sistemas agroforestal, silvopastoril y convencional respectivamente. Los máximos valores se deben a sistemas que proveen materia orgánica de lenta descomposición y mayores contenidos de agregados biogénicos y de raíces.

Por otra parte, en los sistemas estudiados se observa la señal $\delta^{13}\text{C}$ en el rango de -22 ‰ a -26 ‰, propia de plantas C3 ó bosques. Aunque el sistema convencional posee pasturas degradadas, su señal isotópica es proveniente del bosque que estuvo hace 80 años. Así mismo éste sistema, presenta las mayores pérdidas de nitrógeno, con valores de $\delta^{15}\text{N}$ de 9,19 ‰ mientras el sistema agroforestal exhibe un nivel de $\delta^{15}\text{N}$ de 7,30 ‰.

Adicionalmente, se evaluó el potencial de la espectroscopía NIR para la predicción del C, N, ^{13}C y ^{15}N en éste suelo Oxisol del Caquetá, con el fin de generar curvas de calibración empleando el modelo matemático de PLS Modificado – SNV Detrend. Las curvas se obtuvieron usando la totalidad del espectro y arrojaron SEC y SECV de prácticamente cero, RSQ cercanos a uno y RPD de 3.32, 5.02, 3.88 y 3.24 respectivamente. Los RPD superiores a 3.0, garantizan la predicción de la concentración de las muestras desconocidas.

Finalmente, el Modelo Century confirma el potencial de los sistemas de almacenar carbono en el futuro y sus simulaciones fueron avaladas con los test estadísticos evaluados: $r=0.9584$, $CD= 0.8185$, $RMSE=14.42$ toneladas C/ha y $M=0.0182$.

Palabras claves: Dinámica de la materia orgánica, ^{13}C y ^{15}N , Ecuaciones Alométricas, Almacenamiento de carbono, NIR, Modelo Century

Abstract

The conservation of forests is a necessary condition for the maintenance of global warming within the desired limit of 2 ° C. In the Colombian Amazonian Piedemonte, the main economic activity is dual-purpose livestock, which generates income from the sale of milk and meat. However, the impact of high rainfall on poorly covered soils, inadequate management of pastures with high grazing pressures and the use of areas not suitable for livestock, among others create soil compaction and erosion.

The purpose of this work was to establish the impact of the Amazon deforested on the global cycle of C, analyzing its dynamics in three systems of land use derived from the initial forest in the Department of Caquetá to compare its impacts. A Conventional System was chosen - derived from a forest cut 80 years ago (native pastures, legumes and weeds), a Silvopastoral System - derived from a forest cut 60 years ago (Forage Diversity) and an Agroforestry System - from 20 to 30 years with crops (Caucho, Copoazú and Arazá). The carbon storage potential of the aerial biomass (allometric equations), the soil and the aggregates, the stability and content of the organic matter (Stable Isotopes) were determined in each system, in order to know the effect on the dynamics of the organic matter by the alteration of the native forest and to identify sustainable agricultural practices that contribute to an improvement in the quality of the soil and in the mitigation of global warming.

The pastures exhibited the lowest average values of carbon storage in the soil (0 to 30 cm) (46,11 ton C / ha) while in the agroforestry systems higher levels were obtained (52,83 ton C / ha). On the other hand, in aerial biomass, the levels found were 108.04, 48.80 and 25.77 Mg C / ha for the agroforestry, silvopastoral and conventional systems, respectively. The maximum values are due to systems that provide organic matter of slow decomposition and higher contents of biogenic aggregates and roots aggregates.

On the other hand, in the studied systems the signal $\delta^{13}\text{C}$ is observed in the range of -22 ‰ to -26 ‰, typical of C3 plants or forests. Although the conventional system has degraded pastures, its isotopic signal comes from the forest planted 80 years ago. Likewise, this system has the highest nitrogen losses, with values of $\delta^{15}\text{N}$ of 9.19 ‰ while the agroforestry system exhibits a level of $\delta^{15}\text{N}$ of 7.30 ‰.

Additionally, the potential of NIR spectroscopy was evaluated for the prediction of C, N, ^{13}C and ^{15}N in this Oxisol soil of Caquetá, in order to generate calibration curves using the mathematical model of PLS Modified - SNV Detrend. The curves were obtained using the entire spectrum and the values of SEC and SECV were practically zero, RSQ close to one and RPD of 3.32, 5.02, 3.88 and 3.24 respectively. The RPD were higher than 3.0, guarantee the prediction of the concentration of the unknown samples.

Finally, the Century Model confirms the potential of carbon storage systems in the future and its simulations were supported by the statistical tests evaluated: $r = 0.9584$, $\text{CD} = 0.8185$, $\text{RMSE} = 14.42$ tons C / ha and $M = 0.0182$.

Keywords: Organic matter dynamics, ^{13}C and ^{15}N , Allometric equations, Carbon storage, NIR, Century Model

Dedicatoria

*A mi hijo Juan Camilo, gran tesoro y motor
de mi vida*

*A mi padre Benjamín, ejemplo de honestidad,
valor y responsabilidad*

*A mi madre María Inés, símbolo de fortaleza,
amor y apoyo incondicional*

*A mi hermana Clara Inés, un ser colmado de
generosidad, bondad y solidaridad infinita.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, por la formación profesional brindada durante el estudio del doctorado.

A la Agencia Nacional de Investigación – ANR de Francia, por la financiación total de éste proyecto de investigación.

Al Doctor Patrick Lavelle, por la dirección de ésta tesis y el apoyo brindado desde la etapa de muestreos hasta la finalización del proyecto. A la Doctora Elena Velásquez de la Universidad Nacional Sede Palmira, por la codirección de ésta investigación.

A Hernán Mezú Mina y Arbey Alvarez Sánchez, por su amistad y ayuda en los extenuantes muestreos en el Departamento de Caquetá. Sin ésta fase, no se habría culminado con éxito la investigación.

A los laboratorios de Servicios Analíticos y Física de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, por el procesamiento parcial de las muestras de suelo recolectadas.

A los Doctores Juan Carlos Menjivar (Universidad Nacional-Sede Palmira), Carlos Eduardo Cerri (Universidad de Sao Paulo, Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz) y Jesús Larrahondo (CENICAÑA), por sus valiosos aportes como jurados quienes contribuyeron a mejorar la calidad del documento.

A los Doctores Michel Grimaldi (IRD), Thierry Desjardins (IRD) y Sylvain Dolédec (Universidad de Lyon) por compartir los conocimientos en sus diferentes disciplinas, ayudándome en mi crecimiento profesional.

A las Doctoras Mariela Rivera, Yolanda Rubiano y Carmen Alicia Parrado por la amistad y fortaleza que me brindaron durante todo el proceso del doctorado.

A mis grandes amigos, John Eiver Belalcázar (CIAT), Doris Builes (BAXTER) y Nubia Rodríguez (AGROSAVIA La Libertad) por no dejarme rendir en los momentos difíciles y con su presencia hacer del camino de la vida un mágico viaje.

A todos y cada una de las personas que con su cariño sincero, confiaron siempre en mí.

Contenido

	Pág.
Resumen	III
Abstract.....	V
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. OBJETIVOS.....	5
1.1 Objetivo general	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
2. HIPÓTESIS.....	6
3. Efecto del uso del suelo en el potencial del almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa aérea	7
3.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa y en los suelos de los sistemas de uso de la Amazonía.....	7
3.2 Agregación del suelo y del almacenamiento de carbono	8
3.2.1 Variables ambientales	8
3.2.2 Agentes inorgánicos.....	9
3.2.3 Fauna del suelo	9
3.2.4 Raíces.....	9
3.2.5 Microorganismos	10
3.3 Materiales y Métodos	10
3.3.1 Localización del estudio	10
3.3.2 Diseño Experimental	11
3.4 Unidades experimentales, variables a medir e información complementaria..	14
3.5 Análisis estadístico de la información	14
3.6 Almacenamiento de carbono en el suelo.....	15
3.6.1 Muestreo y determinación de Carbono.....	15
3.6.2 Preparación de la muestra	16
3.6.3 Análisis de la muestra	18
3.7 Predicción de las propiedades químicas del suelo por espectroscopía de infrarrojo - NIR	18
3.7.1 Preparación de la muestra	18

3.7.2	Análisis de la muestra	18
3.7.3	Curva de calibración.....	19
3.7.4	Cuantificación de las muestras	20
3.7.5	Curvas de calibración NIR.....	20
3.7.6	Segunda derivada de las señales espectrales	23
3.8	Determinación de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea por medio de ecuaciones alométricas.....	27
3.9	Discusión de resultados	28
3.9.1	Propiedades químicas del suelo	28
3.9.2	Propiedades físicas del suelo.....	29
3.9.3	Morfología del suelo.....	30
3.9.4	Resultados obtenidos en la agregación del suelo	31
3.9.5	Almacenamiento de carbono en el suelo.....	32
3.9.6	Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea	34
4.	Dinámica de la materia orgánica en diferentes usos de suelo	39
4.1	Fauna del suelo, raíces y macroagregación.....	41
4.2	¹³ C de la materia orgánica como integrador de los cambios en la vegetación	43
4.3	Origen de la materia orgánica en el suelo y procesos de transformación y pérdida de nitrógeno.....	45
5.	Modelización de la dinámica de la materia orgánica.....	53
5.1	CANDY (Carbon- Nitrogen-Dynamics)	53
5.2	CENTURY	54
5.3	DAISY	54
5.4	DNDC (Denitrificación and Descomposición)	54
5.5	NCSOIL.....	55
5.6	ROTHC	55
5.7	SOMM.....	55
5.8	ITE (Institute of Terrestrial Ecology – Edinburgh).....	56
5.9	VERBERNE	56
5.10	Modelo century en el estudio de la dinámica de la materia orgánica en los usos de suelo de estudio.....	56
5.11	Calibración de la simulación de los datos de carbono, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano	60
5.12	Simulación de escenarios, en diferentes usos de suelos del Piedemonte Amazónico Colombiano	71
5.12.1	Escenarios de métodos de siembra en el Sistema Tradicional.....	72
5.12.2	Escenarios de pastoreo en los sistemas de uso de estudio	74
5.12.3	Escenarios de implementación de plantaciones y cultivos en el sistema convencional	76
5.12.4	Escenarios de adición de fertilizantes en el sistema convencional.....	77
6.	Conclusiones y recomendaciones	78
	Bibliografía	79

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Localización de los sitios de estudio.....	9
Figura 2-2: Composición del paisaje en los 6 sitios donde se realizó el proyecto AMAZ	
Figura 2-3. Sistemas de Uso de Muestreo.....	10
Figura 2-4. Sistemas Convencional.....	10
Figura 2-5. Sistemas Silvopastoril.....	10
Figura 2-6. Sistemas Agroforestal.....	11
Figura 2-7. Calicata.....	12
Figura 2-8. Molino de balines pistón.....	13
Figura 2-9. Manera de empacar las muestras de suelo.....	14
Figura 2-10. ACP y Circulo de correlación para los parámetros de pH, acidez intercambiable y bases.....	16
Figura 2-11: ACP y Circulo de correlación para los variables físicas del suelo.....	17
Figura 2-12: Espectro NIRS de una muestra de suelo entre 1108 y 2498 nm.....	35
Figura 2-13: Curva de calibración con el NIR.....	36

Figura 2-14: Espectro NIR de una muestra de suelo.....	37
Figura 2-15: Curva de calibración NIR para carbono total.....	38
Figura 2-16: Curva de calibración NIR para $\delta^{13}\text{C}$	38
Figura 2-17: Curva de calibración NIR para $\delta^{15}\text{N}$	39
Figura 2-18: Curva de calibración NIR para Nitrógeno total.....	39
Figura 2-9: Circulo de correlación de la segunda derivada de las longitudes de onda más características de un espectro de suelo.....	40
Figura 2-20: Abundancia de grupos OH de acuerdo al sistema de uso del suelo.....	41
Figura 2-21: Abundancia de grupos C=O de acuerdo al sistema de uso del suelo.....	42
Figura 2-22: Abundancia de grupos C-H de acuerdo al sistema de uso del suelo.....	43
Figura 2-23: Niveles de almacenamiento de carbono en los sistemas de uso de suelo en estudio.....	18
Figura 2-24: ACP y Circulo de correlación para los parámetros de almacenamiento de carbono y contenido de nitrógeno en las tres profundidades.....	19
Figura 2-25: Almacenamiento de carbono en biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo.....	20
Figura 2-26: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de suelo.....	21
Figura 2-27: Almacenamiento de carbono en suelo y biomasa aérea, en las 27 fincas de los 3 sistemas de estudio.....	22
Figura 3-1: Izquierda: modelo general de autoorganización en suelos que integra organismos, ecosistemas y paisajes y las estructuras creadas a cada escala; Derecha: Interacciones y mecanismos que sostienen la liberación de servicios ecosistémicos a escala del paisaje (Lavelle et al., 2006).....	26
Figura 3-2: Diagrama de flujo para la dinámica del carbono en ecosistemas terrestres mostrando los cinco principales compartimientos.....	24
Figura 3-3: Efectos Causados por las lombrices en la materia orgánica del suelo a diferentes niveles de una escala temporal y una espacial.....	25
Figura 3-4: Variación de la señal isotópica de las plantas C_3 y C_4	27
Figura 3-5: Monolito de suelo (0 a 10 cm).....	29

Figura 3-6: ACP y Circulo de correlación para los diferentes tipos de agregados encontrados en el suelo.....	30
Figura 3-7: Evolución de la señal $\delta^{13}\text{C}$, en el carbono orgánico del suelo hasta una profundidad de 30 cm para los tres sistemas en estudio.....	31
Figura 3-8: Procesos de transformación y pérdida de nitrógeno.....	32
Figura 3-9: ACP y Circulo de correlación para las señales isotópicas de ^{13}C y ^{15}N en los tres sistemas de uso.....	33
Figura 3-10: Origen y distribución de la materia orgánica en los agregados del suelo de los tres sistemas de uso.....	34
Figura 4-1. Reservorios y flujos de carbón en el modelo CENTURY. El diagrama muestra los principales factores que controlan los flujos.....	53
Figura 4-2. Modelo de producción vegetal en CENTURY.....	54

Lista de tablas

Tabla 2-1: Cantidad de suelo que se debe pesar en la cápsula de estaño.....	Pág. 14
--	-------------------

Bibliografía

- Anderson, J.M.; Ingram, J.S. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. CAB International, Wallingford, UK. 256 pp.
- Angers, D.A. Caron, J., 1998. Plant – induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 45, 55 – 72
- Arnauld de Sartre X, Oszwald J, Ramirez B, Rodriguez G, Velazquez J, Sebille P, Lavelle P (2011) Caractéristiques socio-économiques d'une intégration régionale en Amazonie colombienne (région de Florencia, Caqueta). *Caravelle. Cahiers du monde hispanique et luso-brésilien*, 96:91–110
- Arocena, J.M., Opio, C., 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 45, 319 – 329
- Barros, A. J. M., Santos, J. C. O., Prasad, S., Leite, V. D., Souza, A. G., Soledade, L. E.B., Duarte, M. S. B., dos Santos, V. D. 2006. Thermal decomposition study of sewage sludge and of organic waste used in the sorption of metals, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83, 2, 291-295
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Crit. Rev. Plant Sci.* 23, 481–504.
- Brown, G.G.; Barois, I.; Lavelle, P. 2000. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *Eur.J.Soil.Biol.* 36, 177 - 198
- Byron, R.N. y Arnold, J.E.M. 1999. What for the people of the tropical forests?, *World Development* 27 (5): 789-805.
- Bossuyt H.; Six J.& Hendrix, P.F. 2005. Protection of soil carbon by micro aggregates within earthworm casts. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 251-258

- Jenkinson D S & Rayner J H 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123, 298-305.
- Jimenez, J. J. & Lal, R. 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25, 337-365.
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlof, J., Lavelle, P. & Lepage, M. 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 32, 153-164
- Jouquet, P., Botinelli, N., Lata, J.C., Mora, P. & Caquineau, S. 2007a. Role of the fungus-growing termite *Pseudacanthotermes spiniger* (Isoptera, Macrotermitinae) in the dynamic of clay and soil organic matter content. An experimental analysis. *Geoderma*, 139, 127-133
- Jouquet, P., Mathieu, J., Choosai, C. & Barot, S. 2007b. Soil engineers as ecosystem heterogeneity drivers. *Ecology Research Progress* (ed. S.I. Munoz), 187-199, Nova Science Publishers, Hauppauge, N.Y.
- Jouquet, P.; Botinelli, N.; Podwojewski, P.; Hallaire, V. & Tran duc, T. 2008a. Chemical and physics properties of earthworm cast compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*. 146, 231-238
- Koutika, L. S., Bartoli, F., Andreux, F., Cerri, C. C., Burtin, G., Chone, T. & Philipp, R. 1997. Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. *Geoderma*, 76, 87-112.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123, 1-22
- Laossi, K.R., Barot, S., Carvalho, D., Desjardins, T., Lavelle, P., Martins, M., Mitja, D., Rendeiro, A. C., Rousseau, G., Sarrazin, M., Velasquez, E., Grimaldi, M. 2008. Effect of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. *Pedobiologia*, 51, 397 - 407
- Lavelle, P.; Spain, A.V., 2001. *Soil Ecology*, Kluwer Academic Publishers, 165 – 169
- Lavelle, P.; Spain, A. V.; Blanchart, E.; Martin, A.; Martin, S. 1992. The impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. En: *Myths and Science of Soils of the Tropics*. SSSA Special Publication. Madison Wisconsin. pp. 157-185.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, S., Spain, A.V., Toutain, F., Barois, I., Schaefer, R. 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics, *Biotropica*, 25(2): 130-150
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur. J. Soil Biol.* 42, 3–15.

- López-Ulloa, M.; Veldkamp, E.; De Koninck, G.H.J. 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal*. 69(4). 1110-1117
- Malhi Y., Wright J. 2004. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Phil. Trans. R. Soc. B* 359: 311–329.
- Mariani, L.; Jiménez, J.J.; Asawaka, N.; Thomas, R.J. & Decaens, T. 2007. What happens to earthworm casts in soil? A field study of carbon and nitrogen dynamics in neotropical savannas. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 757-767
- Martin, A. 1991. Short and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biol.Fertil.Soils*, 11, 234 -238
- Mathieu, J., Rossi, J.P., Grimaldi, M., Mora, P., Lavelle, P., Rouland, C., 2005. A multi-scale study of soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. *Biol. Fertil. Soil* 40, 300–305.
- Meersmans, J.; Van Wesemael, B. & Van Molle, M. Determining soil organic carbon for agricultural soils: a comparison between the Walkley & Black and the dry combustion methods (north Belgium). *Soil use and Management*, 2009, 25, 346-353
- Melillo J.M.; Mcguire A.D.; Kicklighter D.W.; Moore B.; Vorosmarty C.J.; Schloss A.L. 1993. Global Climate Change and terrestrial net primary production. *Nature* 363: 234-240
- Montenegro J.; Abarca S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense*. 26(1), 17-24
- Nepstad, D. C.; Uhl, C. & Serrão, E. A. S. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape – forest recovery and agricultural restoration. *Ambio* 20, 248–255
- Nepstad, D.C.; Carvalho, C.R.; Davidson, E.A.; Jipp, P.H.; Lefebvre, P.A.; Negreiros, G.H.; Da Silva, E.D.; Stone, T.A.; Trumbore, S.E.; Vieira, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666 – 669
- Oszwald, J., Gond, V., Doledec, S., Lavelle, P., 2011. Identification of land-use indicators to assess changes in landscape mosaics. *Bois Et Forets Des Tropiques* 7–21.
- Palm, C.A. 1995. Contribution of agroforestry trees of nutrient requirements of intercropped plants, *Agroforestry systems*, 30, 105 - 124
- Parton, W.J.; Anderson, D.W.; Cole, C.V. et al. 1983. Simulation of soil organic matter formation and mineralization in semiarid agroecosystems, *Nutrient Cycling in Agricultural Ecosystems*, Georgia Experimental Station, Athens, Georgia, 533-550

- Parton, W.J.; D.S. Schimel, C.V. Cole, D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-1179.
- Pulleman, M.M.; Six, J.; Van Breemen, N.&Jongmans, A.G. 2005. Soil organic matter distribution and micro aggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. *European Journal of Soil Science*, 56, 453-467
- Richardson, K., Steffen, W., Schellnhuber, H. J., Barker, T., Kammen, D. M., Leemans, R., Liverman, D., Munashinge, M., Osman-Elaska, B., Stern, N. & Waever, O. Synthesis report. *Climate Change. global risks, challenges and decisions*. In: IARU Climate Change Conference, 2009 Copenhaguen. <http://climatecongress.ku.dk/pdf/synthesisreport/> , 39pp.
- Rilling, M.C.;Wright, S.F.; Shaw, M.R.; Field, C.B.2002b. Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizae but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland. *Oikos*. 97, 52 - 58
- Rondon, M.A. ;Thomas, R.J., A piston – action ball mill for the rapid preparation of plant and soil samples for the automated analysis of nitrogen (¹⁵N) and (¹³C), *Commun.Soil.Sci.Plant.Anal.*, 25 (3&4), 1994, 435 – 445
- Rondon M.; Fernández E.; Wandelli E.; Da Silva R. 2001. Fluxes of methane from soils in the Central Amazon: The role of the agroforestry systems. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University
- Roscoe R.; Buurman, P.; Van Lagen B.; Velthorst, E. 2004. Transformations in occluded light fraction organic matter in a clayey oxisol: evidence from ¹³C-CPMAS-NMR and ¹³C signature . *R.Bras. Ci. Solo*, 28, 811-818
- Saha, S.K.; Ramachandran, P.K.; Nair, V.D.; Kumar, M. 2010. Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems. *Plant Soil*, 328: 433-446
- Semenov, V.M.; Ivannikova, L.A.; Semenova, N.A.; Khodzhaeva, A.K.; Udal'tsov S.N. 2010. Organic matter mineralization in different soil aggregate fractions. *Eurasian Soil Science*, 43 (2), 141-148
- Schimel D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol* 1:77-91
- Silver, W. L., Neff, J., Mergel, M., Veldkamp, E., Keller, M. & Cosme, R. 2000. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, 3, 193 - 209.
- Six, J.; Conant, R.T.; Paul, E.A.; Paustian, K. 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C – saturation of soils. *Plant Soil*, 241, 155 - 176

- Six, J.; Bossuyt H.; Degryze, S.; Deneff K. 2004. Review - A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79, 7-31
- Steinfeld, H. et al, *Livestock's long shadow environmental issues and options*, FAO 2006, p 78 – 123.
- Smith, J.U., P. Smith, T. Addiscott. 1996. Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Ed.) *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets*. Berlin: Springer-Verlag, p.181-200. (NATO ASI Series I, 38).
- Smith, P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. McGill, J.R.M. Arah, O.G. Chertov; K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Mueller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley, A.P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81:153-225
- Subbarao, G. V.; Nakahara, K.; Hurtado, M. P.; Ono, H.; Moreta, D. E.; Salcedo, A. F.; Yoshihashi, A. T.; Ishikawa, T.; Ishitani, M.; Ohnishi-Kameyama, M.; Yoshida, M.; Rondon, M.; Rao, I. M.; Lascano, C. E.; Berry, W. L.; Ito, O., 2009, Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* Pastures, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, issue 41, pp. 17302-17307
- Tan, Z.; Lal, R. 2005. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111, 140-152
- Tian, H., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., McGuire, A. D., Helfrich, J., Moore, B. & Vorosmarty, C. J. 2000. Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 9, 315-335.
- Velasquez, E.; Lavelle, P.; Barrios, E.; Joffre, R. & Reversat, F. 2005. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 889-898
- Velasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A.C. et al 2007. This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia*, 51, 75-87
- Wall, D. H., Bradford, M. A., ST John, M. G., Trofymow, J. A., Behan-Pelletier, V., Bignell, D. D. E., Dangerfield, J. M., Parton, W. J., Rusek, J., Voigt, W., Wolters, V., Gardel, H. Z., Ayuke, F. O., Bashford, R., Beljakova, O. I., Bohlen, P. J., Brauman, A., Flemming, S., Henschell, J. R., Johnson, D. L., Jones, T. H., Kovarova, M., Kranabetter, J. M., Kutny, L., Lin, K. C., Maryati, M., Masse, D., Pokarzhevski, A., Rahman, H., Sabara, M. G., Salamon, J. A., Swift, M. J., Varela, A., Vasconcelos, H. L., White, D. & Zou, X. M. 2008. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology*, 14, 2661-2677.