

Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne)

M. Bernoux⁽¹⁾, D. Arrouays⁽²⁾, C. Cerri⁽¹⁾, P.M. de Alencastro Graça⁽⁵⁾, B. Volkoff⁽³⁾, J. Trichet⁽⁴⁾

- 1 CENA-USP, Biogeoquímica de Solos, Caixa Postal 96, 13400-970 Piracicaba-SP, Brésil.
- 2 INRA Orléans, Unité de Science du Sol, SESCOF, 45160, Ardon, France.
- 3 ORSTOM, 32 Av. H. Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France.
- 4 Univ. d'Orléans, Lab. de Géochimie Organique, B.P. 6759, 45067 Orléans Cedex 2; France.
- 5 INPA, Lab. de Ecologia, Caixa Postal 478, 69011-970 Manaus-AM Brésil.

RÉSUMÉ

L'estimation des stocks de carbone (C) organique des sols est d'une importance considérable, en raison de leur rôle en tant que source ou puits de composés carbonés vis-à-vis de l'atmosphère. L'objectif de ce travail est de comparer différentes méthodes d'estimation des stocks de C organique des sols forestiers. Nous présentons ici des résultats concernant l'évaluation de ces stocks en milieu tropical, pour l'état du Rondônia (Amazonie brésilienne) qui est une zone de forte expansion des défrichements. Une base de données a été élaborée à partir des résultats d'analyses d'horizons de sols échantillonnés lors de campagnes de prospection réalisées à la fin des années 70 et au début des années 80. La densité apparente est estimée à partir de régressions multiples faisant intervenir d'autres paramètres édaphiques disponibles.

Nous comparons les stocks calculés par sommation des données disponibles jusqu'à un mètre de profondeur, ou par intégration d'un modèle de répartition verticale du carbone. Nous comparons également les stocks régionaux obtenus soit à partir des unités cartographiques, soit par des interpolations géostatistiques des stocks totaux ou des trois paramètres du modèle de répartition verticale. Même si les effets « pépite » sont très importants, les résultats de la validation croisée et de la validation externe prouvent que ces modèles sont valides.

La démarche suivie permet une estimation relativement précise des stocks de C organique des sols d'un vaste secteur géographique. Cette démarche devrait permettre une meilleure quantification de l'effet des principaux déterminants (climat, texture, végétation, géologie, topographie, etc.) de la répartition spatiale et verticale du carbone dans ces sols. Enfin, une estimation fiable des stocks préalables au défrichement constitue la base indispensable à l'évaluation de leur impact sur le bilan atmosphérique en carbone.

Mots clés

Sol, carbone, stocks, variabilité spatiale, géostatistique, Amazonie.

SUMMARY

ESTIMATING SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN RONDÔNIA (BRAZILIAN AMAZON)

Estimating soil organic carbon storage is of great importance as soils may act as sources or sinks of CO₂ for the atmosphere. This paper provides results on such an estimate for tropical soils. We aim to estimate the stocks under forest vegetation before clearing. The objective of this work is to compare various methods of estimation of these stocks in Rondônia where forest clearing is continuously increasing. We aim to estimate the stocks under forest vegetation before clearing. A soil database was built from previous analytical results available from surveys. Bulk density values were derived from multiple regression with other available parameters. We compare results obtained by summing available values down to 1 meter or by using a model of organic carbon vertical distribution in soils. Average stocks by mapping units and interpolation by geostatistics are compared. Geostatistical interpolations were run on the total

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : B*16161 Ex : 1



stocks and on the 3 parameters of the vertical model separately. Even though nugget effects were high, cross validation and external validation proved these models to be valid. Our method enables a rather precise estimate of organic carbon stocks within a large area. We think that this method will enable soon to quantify the effect of various soil forming factors on organic carbon. Moreover, a precise estimate of stocks before clearing will constitute a basis for assessing clearing impact on atmospheric CO₂ balance.

Key-words

Soil, carbon, stocks, spatial variability, geostatistics, Amazon.

RESUMEN

ESTIMACIÓN DE LOS CANTIDADES DE CARBONO DE LOS SUELOS DEL RODONIA (AMAZONA BRASILEÑA)

La estimación de la cantidad de carbono (C) orgánico en los suelos es de una importancia considerable, en razón de impacto como fuente o pozo de compuestos carbónicos para la atmósfera. El objetivo de este trabajo es de comparar diversos métodos de estimación del contenido de carbono de los suelos forestales. Presentamos aquí resultados que conciernen la evaluación de estas cantidades en medio tropical por el estado de Rodania (Amazona Brasileña) que es una zona de fuerte expansión de los desmontes. Un banco de datos fue elaborado a partir de los resultados de análisis de horizontes de suelos muestreados durante las campañas de prospecciones realizadas al fin de los años 70 y al principio de los años 80. La densidad aparente está estimada a partir de regresiones múltiples que hacen intervenir otros parámetros edáficos disponibles.

Se compara las cantidades obtenidas por adición de los datos disponibles hasta un metro de profundidad o por integración de un modelo de repartición vertical del carbono. Se compara también las cantidades obtenidas a partir de las unidades cartográficas, o por interpolación geoestadística de la cantidad total o de los tres parámetros del modelo de repartición vertical. Aun que los efectos « pepita » sean muy importantes, los resultados de la validación cruzada y de la validación externa prueban que estos modelos son válidos.

El método seguido permite una estimación bastante precisa del contenido de carbono orgánico de los suelos de un amplio sector geográfico. Este método deberá permitir una mejor cuantificación del efecto de los principales determinantes (climas, textura, vegetación, geología, topografía, etc.) de la repartición espacial y vertical del carbono en los suelos. Por último una estimación fiable de la cantidad presente antes del desmonte constituye una base indispensable para la evaluación de su impacto sobre el balance atmosférico del carbono.

Palabras claves

Suelo, carbono, cantidad, variabilidad espacial, geoestadística, Amazona.

RESUMO

ESTIMATIVAS DE ESTOQUES DE CARBONO NOS SOLOS DO RONDÔNIA (AMAZÔNIA BRASILEIRA)

A estimativa dos estoques de carbono orgânico dos solos é de suma importância pelo fato de atuarem como fonte ou sumidouro de CO₂ para a atmosfera. Este estudo apresenta os primeiros resultados sobre as estimativas para solos tropicais em Rondônia (Amazônia brasileira). O objetivo deste trabalho é comparar diversas metodologias que avaliam estes estoques, em Rondônia, onde o desmatamento é contínuo. Foi elaborada uma base de dados a partir de resultados provenientes de levantamentos de solos sob vegetação original. Os valores da densidade do solo foram obtidos por regressões múltiplas com outros parâmetros do solo. Foram comparados os resultados provenientes do somatório dos valores disponíveis até um metro de profundidade, e os provenientes de um modelo de distribuição vertical do carbono orgânico nos solos. Também foram comparados os estoques regionais obtidos a partir de médias por unidade cartográfica, da interpolação com métodos geoestatísticos dos estoques pontuais, e a partir dos três parâmetros do modelo de distribuição vertical. Apesar dos efeitos pepita serem importantes, as validações cruzadas e externas mostram que estes modelos são válidos. O procedimento usado neste trabalho possibilitou uma estimativa precisa do carbono estocado numa área extensa. Esta metodologia deveria permitir a quantificação do efeito dos principais determinantes (clima, textura, vegetação, geologia, topografia, etc.) da repartição espacial e vertical do carbono nestes solos. Uma estimativa precisa dos estoques de carbono antes do desmatamento constitui a base indispensável para acessar o impacto do desmatamento no balanço atmosférico em carbono.

Palabras claves

Solo, carbono, estoques, variabilidade espacial, geoestadística, Amazônia.

Le bassin amazonien, qui représente presque la moitié des forêts tropicales sempervirentes mondiales, est soumis à une intense déforestation. Une estimation récente suggère que 9,4 % de l'Amazonie brésilienne ont été défrichés. Ce taux de défrichement est particulièrement élevé dans certaines zones d'expansion : en 1994, 42 000 km² avaient déjà été défrichés dans l'état du Rondônia, soit 17,2 % de la surface, et le taux annuel était encore de 2 600 km²/an soit 1,1 %/an.

Le défrichement modifie les cycles biogéochimiques, notamment celui des macro-éléments (carbone, azote, soufre et phosphore). C'est pourquoi il est important de connaître le rôle de la forêt amazonienne et les conséquences de son exploitation dans le stockage ou la libération de carbone vers l'atmosphère. En effet, les préoccupations concernant le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en CO₂ de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en terme de source ou de puits de CO₂ (Post *et al.*, 1982 ; Schlesinger, 1984 ; Bouwman, 1989) et sur l'impact des actions humaines, particulièrement en milieu tropical (Detwiler, 1986 ; Houghton *et al.*, 1991 ; Lugo et Brown, 1993). Compte tenu de l'importance de la forêt amazonienne et de son taux de défrichement, celle-ci est à même de jouer un rôle significatif dans les bilans globaux planétaires (Ceri *et al.*, 1994).

Les travaux de Moraes et ses collaborateurs (Moraes *et al.*, 1995) donnent une première estimation des stocks de carbone organique et d'azote du bassin amazonien brésilien : 47 Pg (1Pg = 1015g) de carbone et 4,4 Pg d'azote étaient stockés dans le premier mètre de sol lorsque les 5.000.000 de km² étaient encore sous végétation naturelle. Ces valeurs, comparées aux estimations des stocks mondiaux (~1500 Pg d'après Eswaran *et al.*, 1993, et Batjes, 1996), montrent que les sols amazoniens sous végétation naturelle contenaient environ un trentième de ces stocks.

Cependant, les estimations des teneurs en carbone des sols faites à partir d'un nombre limité de données sur de vastes espaces se heurtent au problème de la forte variabilité spatiale de cette variable. Ainsi, la connaissance de cette variabilité est-elle une étape nécessaire pour produire des estimations plus fiables du bilan global du carbone pour l'Amazonie.

L'objectif de ce travail est de comparer différentes méthodes d'estimation des stocks de C organique des sols du Rondônia, zone de forte expansion des défrichements. Nous ne considérerons que l'évaluation des stocks initiaux présents dans les sols forestiers préalablement au défrichement.

MATERIEL ET METHODES

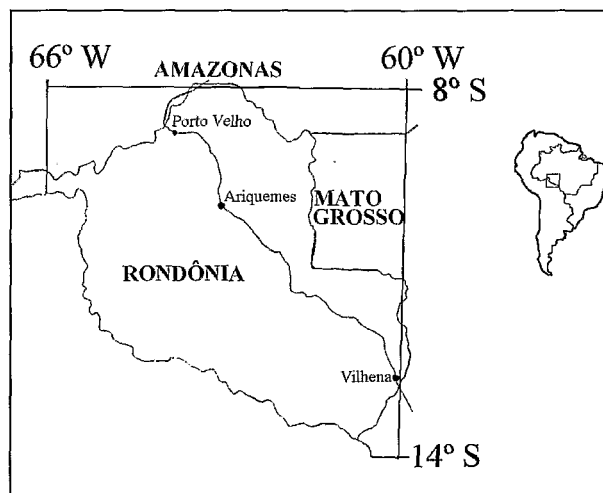
Localisation de la zone d'étude et nature des sols

La zone d'étude, centrée sur l'état du Rondônia, est située à la frontière bolivienne et correspond au territoire brésilien compris entre 8° et 14° de latitude Sud et 60° et 66° de longitude Ouest, totalisant environ 334 000 km² (figure 1). Du fait de cette étendue, ni le climat ni la végétation n'y sont uniformes. La géologie, bien qu'à dominante de socle cristallin précambrien, présente un large éventail de types de roche. Ceci a pour conséquence l'existence d'une grande variété de sols.

Néanmoins, deux types de sol dominant nettement dans cette région. Ce sont les « Latossolos » et les « Podzólicos Vermelho Amarelo » de la classification brésilienne (figure 2). Les « Latossolos » correspondent aux Oxisols de la Soil Taxonomy (USDA, 1996) et aux Ferralsols de la légende FAO (FAO-UNESCO, 1990). Dans la classification française, il s'agit de sols ferrallitiques, en général fortement désaturés, typiques. Ils sont profonds de plusieurs mètres et bien drainés. Les « Podzólicos Vermelho Amarelo » forment un ensemble plus complexe de Kandisols et d'Ultisols (USDA, 1996), d'Acrisols et Lixisols (FAO-UNESCO, 1990). Leurs équivalents dans la classification française sont essentiellement des sols ferrallitiques et quelques sols ferrugineux tropicaux. Ce sont tous des sols relativement profonds, plus ou moins acides et plus ou moins bien drainés.

Figure 1 - Localisation de la zone d'étude

Figure 1 - Location of the study area



Base de données

Une base de données a été élaborée à partir des résultats d'analyses physico-chimiques d'horizons de sols échantillonnés lors de campagnes de prospection réalisées à la fin des années 70 et au début des années 80, et publiés sous forme de rapports (Ministério das Minas e Energia, 1978; 1979; Rodrigues, 1980; Embrapa, 1983).

Dans ces rapports, les teneurs pondérales en carbone sont données en g/100g de terre fine par horizon. Afin de parvenir à une évaluation des stocks, nous avons effectué une première correction tenant compte de la teneur en éléments grossiers (fraction > 2 mm supposée dépourvue de carbone). L'évaluation de la densité apparente (DA) a été réalisée par utilisation de régressions multiples avec d'autres paramètres disponibles. Sur l'ensemble de l'Amazonie, 212 horizons de sols « Podzolicos » et 62 horizons de « Latossolos », pour lesquels la densité était connue, ont servi de base à l'élaboration de ces régressions (Bernoux *et al.*, 1998). Les régressions utilisées pour ce travail s'écrivent :

(1) Pour les « Latossolos »

DA = 1,419 - 0,0037 Argile - 0,061 C, pour les horizons A

DA = 1,392 - 0,0044 Argile, pour les horizons B

(2) Pour les « Podzolicos »

DA = 1,133 - 0,041 C + 0,0026 Sable, pour les horizons A

DA = 1,718 - 0,0056 Argile - 0,068 pH_{eau}, pour les horizons B

(3) Pour tous les autres types de sol :

DA = 1,526 - 0,056 C - 0,0028 Argile + 0,0028 Fr2mm - 0,048 pH_{KCl}, pour les horizons A

DA = 1,722 - 0,0048 Argile - 0,069 pH_{eau} - 0,048 C, pour les horizons B

Avec C = carbone organique en g/100g; Argile = pourcentage d'argile; Sable = pourcentage de sable (>50 µm); Fr2mm = pourcentage pondéral de la fraction > 2 mm; pH_{eau} et pH_{KCl} = pH mesuré dans H₂O ou dans KCl 1N, respectivement.

Cartes des sols

Deux cartes de sols étaient disponibles sur la zone d'étude : la carte du Brésil au 1:5.000.000 de l'Embrapa (Embrapa, 1981), et la carte au 1:1.000.000 du projet Radambrasil (Ministério das Minas e Energia, 1978, 1979). La première (carte au 1:5.000.000) a été digitalisée par le u.s.g.s. (US Geological Survey, EROS data center, Sioux Falls, South Dakota, USA) et est distribuée sous la forme d'un fichier ARC/INFO par la FAO/UNEP. La seconde (carte au 1:1.000.000) a été numérisée par nos soins à partir des cartes annexées aux volumes 16 et 19 du projet Radambrasil.

Les plages cartographiques de ces cartes représentent des associations de sols dont un type domine les autres. Le tableau 1 montre la répartition des unités cartographiques pour

ces deux cartes. Les « podzolicos » et les « Latossolos » couvrent respectivement plus de 37 et 34 % de la surface étudiée. Seuls trois autres types de sol occupent plus de 5 % de la surface : « Lateritas », « Areias Quartzosas » et « Solos Litólicos » (figure 2).

Distribution verticale du carbone dans les profils et calcul des stocks

Classiquement, les stocks de carbone sont obtenus par horizon en effectuant le produit de la densité apparente, de la concentration moyenne en C, et de l'épaisseur de l'horizon. Le stock de carbone sur une profondeur donnée, le plus souvent le premier mètre de sol, est le résultat de l'addition des stocks par horizons jusqu'à cette profondeur. Nous avons réalisé ce calcul pour la profondeur de 100 cm (valeurs P100 en kg/m²).

Selon Arrouays et Pélissier (1994) la distribution des stocks de C sous forêt peut être modélisée selon une équation d'amortissement exponentiel qui s'écrit :

$$(CX - C_2) / (C_1 - C_2) = (e^{-bX} - e^{-bX_2}) / (e^{-bX_1} - e^{-bX_2})$$

X et CX sont la profondeur médiane (cm) et le taux de C d'un échantillon donné (g.cm⁻³), X1 et C1 sont les mêmes variables mais relatives à la couche de surface, et X2 et C2 à une couche plus profonde. b est un coefficient qui traduit la courbure du profil.

Pour cette étude X1 et X2 ont été arbitrairement fixés à 0 cm et 100 cm, et C₁ et C₂ représentent donc respectivement la concentration volumique théorique au contact litière/sol et à 100 cm de profondeur. L'équation d'amortissement s'écrit alors :

$$(CX - C_2) / (C_1 - C_2) = (e^{-bX} - e^{-100b}) / (1 - e^{-100b})$$

Les équations de régressions ont été calculées pour chaque profil à l'aide du module d'estimation non linéaire du programme Statistica® (Statsoft Inc) qui utilise un algorithme de Marquardt. Le stock de C (M100, en kg/m²) dans le premier mètre du sol est alors obtenu par intégration de CX, à travers à la formule suivante :

$$M100 = 10 (C_2 - (K_1 \cdot K_2) + (K_2 / b) \cdot (1 - K_1))$$

$$\text{avec } K_1 = \exp(-100 \cdot b) \text{ et } K_2 = (C_1 - C_2) / (1 - K_1)$$

Analyses géostatistiques

La variabilité spatiale de chaque paramètre du modèle (C₁, C₂ et b) a été étudiée par analyse géostatistique. Les analyses géostatistiques ont été menées à l'aide du programme GS+ (Gamma Design Software, 1991). Les semivariogrammes omnidirectionnels ont été calculés avec un pas de 50 km jusqu'à 600 km d'extension, sur les populations après suppression des extrêmes (valeurs distantes de plus de 3 fois la distance interquartile à partir des quartiles).

Nous avons procédé à deux types de validation : une validation croisée et une validation externe. Dans la procédure de

Tableau 1 - Superficie (km²) des plages cartographiques pour les cartes à 1:1 000 000 (Ministério das Minas e Energia, 1978, 1979) et à 1:5 000 000 (Embrapa, 1981)

Table 1 - Area (km²) of Soil map units in the 1:1 000 000 (Ministério das Minas e Energia, 1978, 1979) and the 1:5 000 000 (Embrapa, 1981) soil maps

Classification brésilienne	Symboles	Carte Radam 1:1.000.000	Carte Embrapa 1:5.000.000
Podzólico Vermelho Amarelo distrofico	PVA	99063	89942
Podzolico Vermelho Amarelo eutrofico	PVE	32987	35919
Latossolo Amarelo	LA	53417	56913
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	58093	57309
Latossolo Vermelho Escuro	LVE	1111	1124
Areias Quartzosas	AQNH	14839	20511
Areias Quartzosas Hidromórficas	AQ	2188	1548
Cambissolo Tropical eutrofico	Ce	5814	-
Cambissolo Tropical álico	Ca	720	-
Cambissolo Tropical distrofico	Cd	2050	849
Gley Pouco Humico	GPH	9393	3944
Brunizém Avermelhado	BA	1005	-
Terra Roxa Estruturada	TRE	2416	5268
Solos Aluvias	SA	2167	2258
Lateritas	PI	16477	22135
Podzol Hidromórfico	PH	1132	377
Solos Litólicos distróficos	SLd	22063	32006
Solos Litólicos eutróficos	SLe	2798	2614
Affleurement de Roches	AR	5752	
Eau	748	1820	
Superficie des sols		327731	332717
Superficie Totale		334231	334537

validation croisée, chaque valeur est retirée du jeu de données l'une après l'autre et sa valeur est estimée par krigeage ordinaire à partir des données restantes. Si la moyenne des différences (VEM) entre les valeurs mesurées et celles estimées est proche de zéro, il n'y a pas de biais systématique. De même, une moyenne des carrés des erreurs standardisées de validation croisée (VMSE) proche de l'unité indique une bonne adéquation du modèle et de ses paramètres. Cette technique de validation conduit, en fait, à une validation interne au jeu de données, mais ne permet pas de savoir si le modèle du variogramme est également adapté à des données externes.

Une validation dite externe a été réalisée : avant chaque analyse variographique, 10 % du jeu initial de données sont mis de côté. Les valeurs à préserver sont choisies en prélevant

une mesure toutes les 10 mesures après organisation en longitude et latitude croissantes du jeu initial de données. Un jeu de données réduit (90 % de l'information) sert à l'étude variographique et l'autre jeu de données (10 %) sert de validation externe. Ce jeu de validation externe sert à calculer, premièrement, une erreur moyenne (EM) définie comme la moyenne des différences entre les valeurs mesurées et celles estimées, et, deuxièmement, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). EM doit être proche de zéro pour une méthode d'estimation non biaisée, et RMSE doit avoir la plus petite valeur possible pour une estimation précise.

Après validation, les cartes ont été obtenues par krigeage par bloc, avec une taille de bloc de 1 km x 1 km.

RESULTATS

Base de données

La base de données est constituée des résultats d'analyses de 3 016 horizons de sol correspondants à 796 profils. Toutefois, uniquement 782 profils étaient géoréférencés, et parmi ceux-ci 639 (2534 horizons) comportaient des résultats d'analyse de carbone organique. La suite de l'étude porte sur ces 639 profils (tableau 2).

Stocks et distributions verticales de carbone

Le stock de C dans le premier mètre de sol (variable P100) a pu être calculé de manière classique pour 324 profils, soit un peu plus de la moitié de ceux-ci. En effet, nombre de profils ne disposent pas de données analytiques pour tous les horizons.

L'ajustement de la distribution verticale du C à l'aide du modèle d'amortissement exponentiel a été calculé sur 424 pro-

files géoréférencés où des données étaient disponibles dans au moins trois horizons. Les résultats montrent que ce modèle s'adapte bien aux données avec seulement deux valeurs de r^2 inférieures à 0,50 et 416 valeurs de r^2 supérieures 0,80 dont 367 sont supérieures à 0,95.

Le tableau 3 fournit des données statistiques élémentaires sur les stocks calculés de façon classique (P100) ou par intégration du modèle d'amortissement exponentiel (M100), ainsi que sur les paramètres du modèle.

Les distributions sont très dissymétriques, c'est une des raisons pour lesquelles pour l'approche géostatistique les études variographiques ont été menées sur les populations sans les extrêmes.

Sur l'histogramme présenté (figure 3), on constate que l'apparente dissymétrie des distributions s'estompe beaucoup si l'on supprime les extrêmes, en particulier les valeurs les plus fortes. Par contre, ces extrêmes n'ont pas été retirés dans le calcul basé sur les plages cartographiques, il n'y a pas de rai-

Tableau 2 - Nombre d'horizons et de profils présentant des résultats d'analyse de carbone

Table 2 - Number of layers and of soil profiles having organic carbon data

Nombre d'horizons échantillonnés par profil décrit	Nombre de profils correspondants	Nombre de valeurs P100	Nombre de valeurs M100	Intersection des M100 et P100
1	19	-	-	-
2	134	2	-	-
3	89	12	57	9
4	116	61	97	54
5	148	121	139	115
6	87	83	85	81
7 et plus	46	45	46	45
Total	639	324	424	304

P100 : Stocks de carbone calculés de façon « classique »

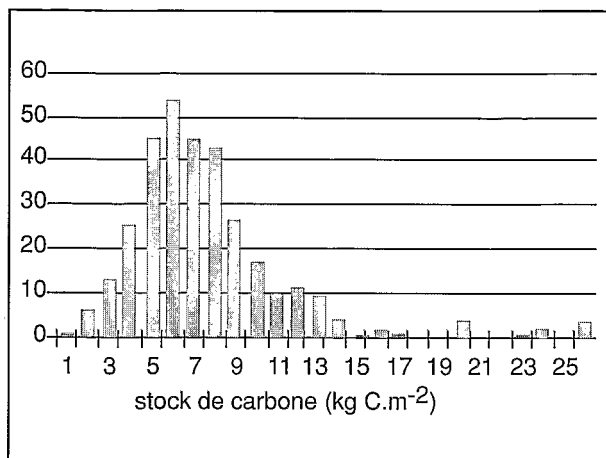
M100 : Stocks de carbone calculés par intégration du modèle

Tableau 3 - Statistiques élémentaires sur les stocks (kgm^{-2}) calculés selon les deux méthodes (P100 et M100) et sur les paramètres du modèle

Table 3 - Summary statistics on C stocks values (kgm^{-2}) calculated using the two methods (M100 and P100), and on the model

Variable	n	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	SD
P100	324	7,296	6,294	0,605	41,618	4,505
C1	424	2,722	2,170	0,336	26,841	2,340
C2	424	0,314	0,288	0,000	1,169	0,168
b	424	0,0577	0,0479	0,0008	0,3202	0,0420
M100	424	7,324	6,553	1,502	25,185	3,517

Figure 3 - Histogramme de distribution de la variable P100
Figure 3 - Frequency distribution of the variable P100



son pour cela, puisque l'on utilise les médianes qui sont peu sensible aux extrêmes.

Il reste qu'une transformation de variable serait possible mais :

(1) cela compliquerait fortement le calcul pour recomposer une grille de valeur à partir des grilles C_1 et C_2 et b.

(2) Les résultats de la validation externe valident a posteriori la démarche que nous avons retenue.

On note que les valeurs moyennes de P100 et M100 sont très proches. Le coefficient de corrélation linéaire entre les valeurs de P100 et M100 est égal à 0,972. Ces résultats montrent que le modèle d'amortissement, mis au point sur des sols tempérés, est applicable à notre jeu de données.

Une première estimation des stocks totaux peut être réalisée en multipliant les valeurs moyennes (ou médianes) par la superficie :

$$\text{P100} \times \text{superficie de sols} = 2400 + 1500 \text{ Tg} \\ (62 \% \text{ d'erreur, médiane} \sim 2100 \text{ Tg; } 1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g})$$

$$\text{M100} \times \text{superficie de sols} = 2450 + 1170 \text{ Tg} \\ (48 \% \text{ d'erreur, médiane} \sim 2180 \text{ Tg; } 1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g})$$

Valeur par type de sol

En utilisant la classification des sols de la base de données, et sans suppression des extrêmes, nous avons pu calculer les statistiques élémentaires sur les stocks de carbone par unité taxonomique (tableau 4) :

Le stock total peut ainsi être calculé en multipliant la valeur du stock moyen par la surface de chaque unité :

$$\text{Valeur par unité taxonomique} \times \text{Superficie de l'unité} = \\ 2127\text{-}2399 + 900 \text{ Tg} (40 \% \text{ d'erreur})$$

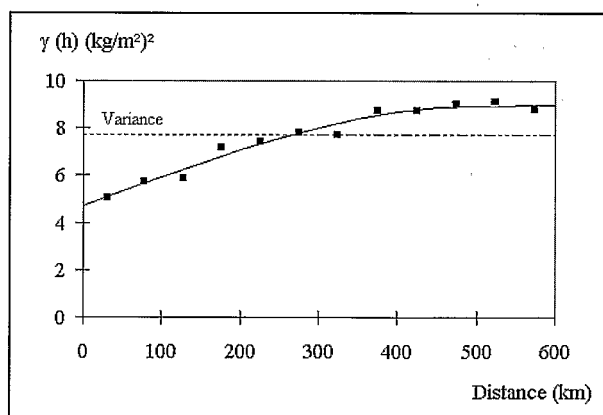
Les calculs donnent des résultats sensiblement équivalents selon que l'on utilise l'une ou l'autre des deux cartes et l'une ou l'autre des deux techniques d'estimation des stocks. L'estimation des stocks totaux varie de 2127 à 2399 Tg avec une erreur standard d'estimation de l'ordre de 900 Tg, soit 40 % de l'estimation.

Approche géostatistique sur la variable stock P100

Une analyse géostatistique a été menée sur la variable P100 (stock de carbone calculé par sommation). Le variogramme (figure 4) a été ajusté par un modèle sphérique (portée = 513 km, pépite = 4,70 (kg/m²)², plateau = 8,96 (kg/m²)²). Ce résultat montre que les stocks de carbone présentent une certaine structuration spatiale à l'échelle de notre terrain. Toutefois, la moitié de la variabilité de ces stocks est susceptible de s'exprimer sur des distances inférieures à quelques dizaines de kilomètres.

Figure 4 - Variogramme expérimental et modèle ajusté pour la variable P100.

Figure 4 - Experimental variogram and fitted model for variable P100



Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle du variogramme décrit bien le jeu de données puisqu'il n'y a pas de biais systématique (VEM = -0,015) et que la VMSE est proche de l'unité (VMSE = 1,121). De plus, les résultats de la validation externe (EM = 0,065 et RMSE = 2,668) prouvent que ce modèle est également adapté à des données externes.

La figure 5 présente la carte des stocks obtenus après krigage par blocs de 1 km² sur la zone d'étude. Au total, ces 334107 valeurs de stock varient de 4,27 à 10,40 kg C.m⁻² et ont pour moyenne 6,67 kg C.m⁻².

Tableau 4 - Stocks de carbone sur 1 m (kg/m^2) par unité taxonomique.**Table 4** - C stocks in the first meter (kg/m^2) in taxonomic units.

	P100						M100					
	n	Moy	Min	Max	SD	Médiane	n	Moy	Min	Max	SD	Médiane
LVA	34	7,49	4,40	19,46	3,03	6,97	51	7,95	4,10	19,60	3,13	7,23
PVA	154	6,40	1,44	23,12	3,14	5,84	188	6,51	1,60	23,44	3,05	5,85
AQNH	17	8,96	4,68	19,13	4,29	6,88	17	8,48	4,64	19,66	4,02	6,71
LA	26	7,30	4,94	10,71	1,48	7,32	30	7,76	5,07	11,62	1,61	7,80
TRE	8	9,52	4,57	15,76	3,80	8,44	15	8,58	4,54	16,13	3,45	7,86
Ce	5	10,61	5,19	23,04	7,63	6,23	5	9,48	5,28	23,54	7,87	6,04
LR	3	19,29	7,12	41,62	19,36	9,14	3	8,34	7,45	9,83	1,30	7,73
Ca	13	5,98	2,30	10,69	2,71	5,51	27	6,90	2,48	10,97	2,60	6,74
LVE	10	6,90	3,78	11,52	2,37	6,65	12	7,16	3,85	12,16	2,29	6,59
PVE	4	5,90	4,16	9,96	2,73	4,74	8	5,96	3,91	10,13	2,14	5,06
PH	4	3,18	1,34	7,62	2,98	1,88	2	8,31	1,50	15,12	9,63	8,31
BA	6	11,14	6,61	19,59	4,78	10,37	8	12,15	7,00	20,15	4,26	12,69
PI	12	7,06	1,80	27,69	6,77	5,78	18	6,75	2,12	24,74	4,89	5,78
Cd	1	13,21				13,21	4	8,55	4,02	13,42	4,40	8,37
GH	4	23,32	9,57	33,79	10,25	24,96	5	17,15	8,76	25,19	5,87	16,79
GPH	9	7,99	3,71	10,86	2,54	7,77	16	7,35	4,06	11,64	2,18	7,06
SA	9	5,57	3,45	11,66	2,45	5,13	10	5,98	4,10	11,69	2,12	5,24
SL	1	6,73				6,73	2	7,41	7,16	7,66	0,36	7,41
AQH	4	6,02	0,61	13,88	5,78	4,79	3	10,29	3,22	14,88	6,21	12,76

Le stock global évalué par cette technique [2220 + 290 Tg (13 % d'erreur)] est très comparable à celui estimé par sommation des valeurs moyennes des unités cartographiques. Toutefois, l'estimation par krigeage présente une erreur nettement plus faible.

Variabilité spatiale des paramètres du modèle de distribution verticale

Les trois paramètres du modèle de distribution verticale du carbone ont été calculés en 424 points, puis nous avons réalisé une analyse variographique sur chacun de ces paramètres traité indépendamment des autres. Les résultats (figure 6) montrent que les paramètres C_1 et C_2 présentent une structuration spatiale, avec toutefois un fort effet pépité. Par contre, le paramètre relatif à la courbure du profil (b) n'a présenté aucune structuration.

Dans les deux cas, le variogramme expérimental a été modélisé par un modèle linéaire, avec pour le paramètre C_1 un effet pépité de $0,85 (\text{kg.m}^{-2})^2$ et une pente de $6,83 \cdot 10^{-4} (\text{kg.m}^{-2})^2.\text{km}^{-1}$, et pour le paramètre C_2 une pépité de $0,0198 (\text{kg.m}^{-2})^2$ et une pente de $1,65 \cdot 10^{-5} (\text{kg.m}^{-2})^2.\text{km}^{-1}$. Même si les effets pépité

sont très importants, les résultats de la validation croisée (tableau 5) et de la validation externe prouvent que ces modèles sont valides.

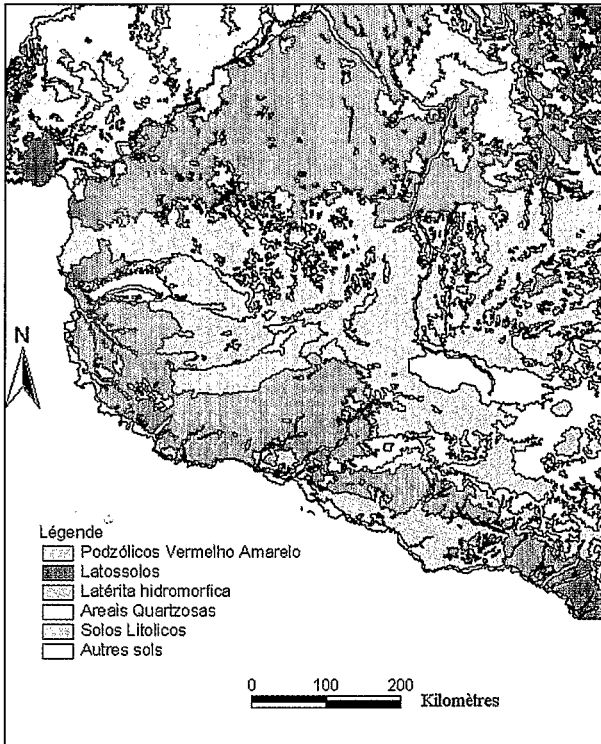
Après validation, les cartes des valeurs des paramètres C_1 et C_2 ont été obtenues après krigeage par blocs de 1 km^2 sur la zone d'étude (figure 7). Au total 334107 valeurs par carte ont été calculées. Les valeurs de C_1 varient de 1,61 à $3,15 \text{ g C.cm}^{-3}$ et ont pour moyenne $2,19 \text{ g C.cm}^{-3}$. Les valeurs obtenues pour le paramètre C_2 varient de 0,23 à $0,50 \text{ g C.cm}^{-3}$, et présentent une moyenne de $0,31 \text{ g C.cm}^{-3}$. Les erreurs associées (C_1 KSD et C_2 KSD) varient ponctuellement de 9 à 23 % dans les deux cas, et l'erreur moyenne est de l'ordre de 15 %.

Validation de la combinaison de la géostatistique et du modèle de la distribution du carbone dans le profil

A partir des valeurs krigées des trois paramètres de la distribution verticale du carbone, il est possible de reconstituer en tout point de l'espace le profil théorique de carbone et de l'intégrer sur un mètre de profondeur. Puisque le paramètre b ne présente pas

Figure 2 - Carte des principaux types de sol de la zone d'étude, établie à partir de cartes à l'échelle du millionième.

Figure 2 - Main soil map units in the study area (from 1:1 000 000 soil map)



de structuration spatiale à ces échelles deux solutions sont possibles : fixer une valeur pour b (médiane ou moyenne) ou utiliser une moyenne avec fenêtre glissante. L'étude de la population du paramètre b montre que celui-ci présente une distribution log-normale; la médiane est donc plus adéquate que la moyenne pour caractériser cette population.

Cette démarche peut être validée de deux façons différentes. Une première méthode utilise les points réservés pour la validation externe et pour lesquels on dispose des valeurs pour les paramètres C_1 , C_2 et b , soient au total 32 profils ayant un stock moyen de $6,914 \text{ kg C.m}^{-2}$ (en utilisant les valeurs P100) et de $6,975 \text{ kg C.m}^{-2}$ (avec les valeurs M100). L'erreur moyenne obtenue pour ces points par validation externe est faiblement négative ($-0,12$) ou faiblement positive ($+0,039$) selon que l'on utilise les valeurs P100 ou M100.

Un deuxième mode de validation consiste en une comparaison de la grille résultant de l'intégration des valeurs krigées des paramètres C_1 et C_2 , et de la valeur médiane de b , avec la grille des valeurs krigées à partir des valeurs P100. Les écarts (en pourcentage par rapport à la grille des valeurs P100 krigées) varient localement d'une sous-estimation de 21,3 % jusqu'à une surestimation de 37,2 %, et présentent une surestimation globale de 8,2 %. Toutefois les écarts inférieurs à 10 % en valeur absolue concernent plus de 67 % de la zone, et ceux inférieurs à 5 % couvrent plus de 41 %, montrant une bonne adéquation globale entre les résultats issus des deux méthodes.

Figure 5 - Stocks de carbone jusqu'à 1 mètre de profondeur obtenus par krigage des valeurs ponctuelles (P100) et carte des erreurs (KSD).

Figure 5 - Carbon stocks down to 1 m depth obtained by block kriging of punctual values (P100) and maps of associated errors (KSD).

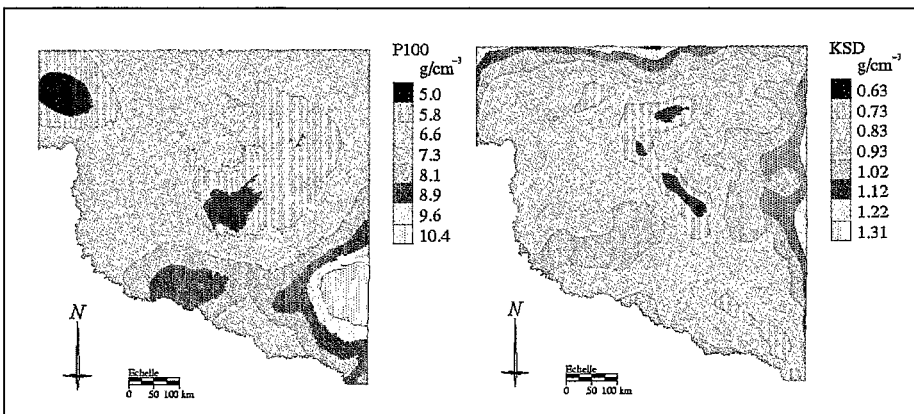
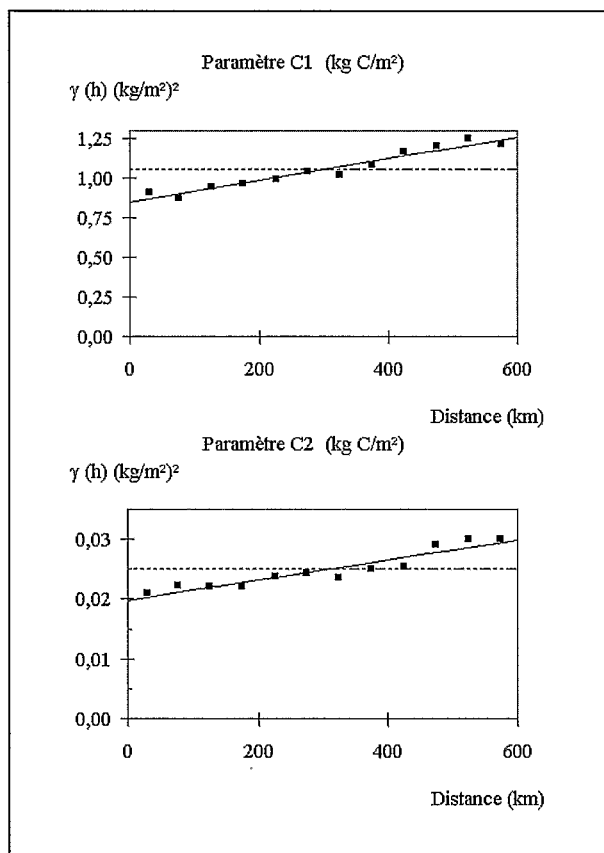


Tableau 5 - Résultats des validations croisée et externe pour les paramètres C_1 et C_2 .**Table 5** - Results of cross validation and external validation for the parameters C_1 and C_2

Variable	n test	VEM	VMSE	n jeu de validation	EM (% moyenne de la population)	RMSE	nombre d'extrêmes
	<i>Validation croisée</i>			<i>Validation externe</i>			
C1	351	0,000	1,051	39	-0,047 (-2,1 %)	0,917	34
C2	380	-0,023	1,064	42	-0,014 (-4,5 %)	0,137	2

Figure 6 - Variogrammes expérimentaux et modèles ajustés pour les variables C_1 et C_2 .**Figure 6** - Experimental variograms and fitted models for the variables C_1 and C_2 .

DISCUSSION

Ordre de grandeur des stocks

Les différentes méthodes d'évaluation des stocks que nous avons comparées conduisent toutes à de mêmes ordres de grandeur. Toutefois, il convient de souligner que l'utilisation de techniques géostatistiques permet de réduire considérablement la fourchette d'erreur de ces estimations.

L'utilisation des résultats publiés par Moraes *et al.* (1995) aurait conduit sur notre secteur à une évaluation des stocks de l'ordre de 3000 à 3200 Tg, soit une surestimation de presque 1 000 Tg par rapport à nos résultats. La différence d'estimation peut être attribuée à plusieurs causes :

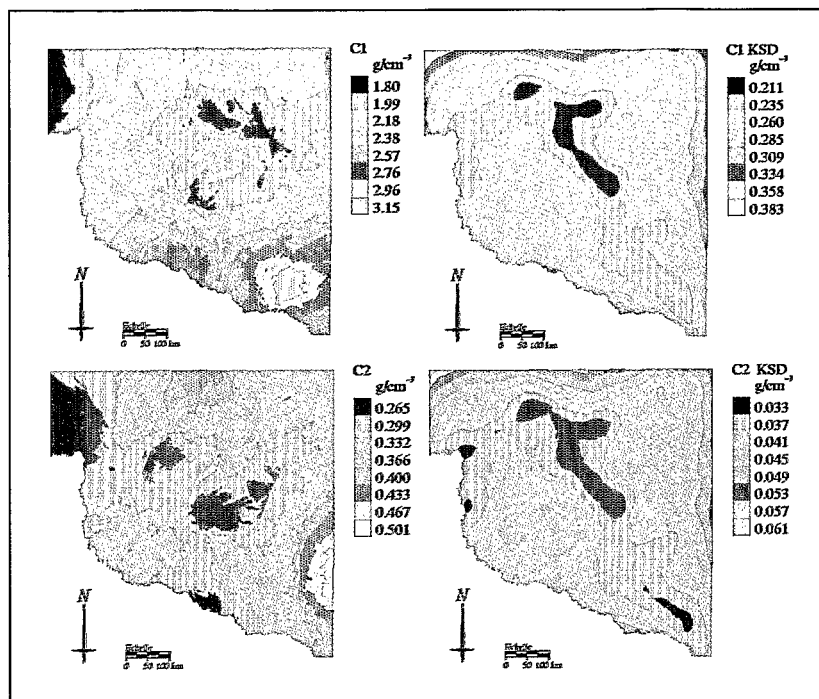
- dans leur calcul, Moraes *et al.* n'ont pas pris en compte le rôle de la fraction > 2 mm, ce qui les conduit à surestimer notablement les stocks dans certaines situations, notamment pour bon nombre de sols « Podzólicos » ;
- ces auteurs ont utilisé une valeur de densité moyenne pour tout le profil sans distinction du type d'horizon A, B ou C ;
- leur travail porte sur l'ensemble de l'Amazonie brésilienne alors que le notre porte sur une surface plus restreinte, où la densité de données est par ailleurs beaucoup plus élevée ;
- la différence est aussi inhérente à la technique utilisée : l'extrapolation d'une valeur moyenne peut se révéler inadéquate, surtout lorsqu'il existe quelques valeurs extrêmes pouvant influencer fortement celle-ci.

Modélisation des profils de carbone

Le modèle d'amortissement exponentiel s'avère adapté aux sols tropicaux de notre étude. Déjà mis au point en milieu tempéré, il semble ainsi bien adapté aux sols forestiers sous divers climats. Il convient toutefois de noter que ce type de décroissance ne peut traduire correctement toutes les situations pédologiques et trouve en particulier une de ses limitations lorsque des horizons d'accumulation de matière organique sont présents en profondeur (par exemple dans les podzols humiques).

Figure 7 - Cartes des valeurs estimées des paramètres C_1 et C_2 et des erreurs respectives associées (C_1 KSD et C_2 KSD).

Figure 7 - Maps of estimated values for the parameters C_1 and C_2 , and maps of associated errors (C_1 KSD and C_2 KSD).



Cartographie des paramètres du modèle

La cartographie des valeurs estimées des paramètres permet de calculer un stock global qui reste du même ordre de grandeur, mais cette méthode apporte, en outre, une information quant à la variation spatiale de ces paramètres.

Le paramètre C_1 (stock en surface du sol) présente un gradient latitudinal assez marqué au sud de la zone d'étude. Ce gradient est probablement attribuable au gradient climatique (effet de la durée de la saison sèche) ainsi qu'à ses effets sur la végétation primaire. La variabilité géographique du paramètre C_2 est, en l'état actuel de nos recherches, plus difficile à interpréter.

Ainsi, les projections cartographiques montrent l'existence de gradients qui posent la question de l'existence et de l'identification des déterminants de ces paramètres. Deux types de déterminants sont à prendre en considération : des déterminants extrinsèques tels que les paramètres climatiques (Benema, 1974) ou la végétation, et des déterminants intrinsèques, tels la texture, la topographie, la géologie, etc. Nous poursuivons actuellement nos recherches sur la reconnaissance de ces déterminants, afin de parvenir à une explication déterministe de la variabilité des profils de carbone dans cette partie du territoire amazonien.

CONCLUSION

La démarche que nous avons suivie consiste en une modélisation des profils de carbone et en une analyse de la structure spatiale des paramètres de ce modèle. Elle permet une estimation relativement précise des stocks de carbone organique des sols d'un vaste secteur géographique. L'équation d'amortissement exponentiel présente un intérêt certain, du fait de sa simplicité et du petit nombre de paramètres permettant sa mise en œuvre. Dans un futur proche, nous pensons que cette démarche permettra une meilleure quantification de l'effet des principaux déterminants (climat, texture, végétation, géologie, topographie, etc.) de la répartition spatiale et verticale du carbone dans ces sols. Enfin, une estimation fiable de l'importance des stocks préalables au défrichement constituera la base indispensable à l'évaluation de leur impact sur le bilan atmosphérique en carbone.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article ont bénéficié de financements de la part de la « Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo » (FAPESP) (contrats 94/6046-0 et 95/1451-6), ainsi que de la « Fundação Coordenação de Aperçoamento de Pessoal de Nível Superior » (CAPES-MEC) (numéro de bourse 2129/95). Nous remercions vivement Christian Feller et Pierre Dagnelie pour leur lecture critique très constructive d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays, D., et P. Pélassier. 1994. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Sci.* 157 : 185-192.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European J. Soil Sci.* 47 : 151-163.
- Benema, J. 1974. Organic carbon profiles in Oxisols. *Pédologie*, XXIV, 2, 119-146.
- Bernoux, M., D. Arrouays, B. Volköf, C. Cerri et C. Jolivet. 1998 (in press). Bulk densities of forested Amazonian soils related with other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Bouwman, A.F. 1989. *Soils and the greenhouse effect*. John Wiley. New York.
- Cerri, C. C., M. Bernoux, et G. J. Blair. 1994. Carbon pools and fluxes in Brazilian natural and agricultural systems and the implication for the global CO₂ balance. *Trans. 15th Int. Cong. of Soil Sci.*, Acapulco, Mexico. Vol 5a : 399-406.
- Detwiler, R.P. 1986. Land use change and the global carbon cycle : The role of tropical soils. *Biogeochemistry* 2 : 67-93.
- Embrapa, 1981. *Mapa de Solos do Brasil*, escala 1:5.000.000, *Projeção Policonica*.
- Embrapa, 1983. *Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Estado de Rondônia*. Contrato Embrapa/SNLCS-Governo do Estado de Rondônia. Rio de Janeiro, Brésil. 895p.
- Eswaran, H., E. van Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 192-194.
- FAO-UNESCO, 1990. *Soil Map of the World - Revised legend*. *World Soil Resources Report 60*. FAO, Rome, Italie, 120 pp.
- Gamma Design Software. 1991. *GS+ : Geostatistics for the agronomic and biological sciences*. Version 1.1. Gamma Design Software, Plainwell, MI.
- Houghton, R.A., D.L. Skole, et D.S. Lefkowitz. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 II. Net release of CO₂ to the atmosphere. *For. Ecol. Manage.* 38 : 173-179.
- Lugo, A. E., et S. Brown. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant Soil* 149 : 27-41.
- Ministério das Minas e Energia. 1978. *Projeto RADAMBRASIL, programa de integração nacional. Levantamento de recursos naturais. Vol 16, Folha SC-20 « Porto Velho », 663 p., 7 Cartes, MME/DNPM, Rio de Janeiro, Brésil.*
- Ministério das Minas e Energia. 1979. *Projeto RADAMBRASIL, programa de integração nacional. Levantamento de recursos naturais. Vol 19, Folha SD-20 « Guaporé », 368 p., 7 Cartes, MME/DNPM, Rio de Janeiro, Brésil.*
- Moraes, J. L., C. C. Cerri, J. M. Melillo, D. Kicklighter, C. Neill, D. L. Skole, et P. A. Steudler. 1995. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59 : 244-247.
- Post, W. M., W. R. Emmanuel, P. J. Zinke, et A. G. Stangenberger. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298 : 156-159.
- Rodrigues T. E. 1980. Solos da Amazônia. p 19-60. In V.H. Alvarez, L.E.F. Fontes, et M.P.F. Fontes (eds.) *O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado*. SBCS-UFV, Viçosa-MG, Brésil.
- Schlesinger, W.H. 1984. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In : *The changing carbon cycle, a global analysis*. Springer Verlag. New York, pp. 194-220.
- USDA, 1994. *Keys to soil taxonomy*. United Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Sixth Edition. 306 pp.