

LE SEMIS DIRECT COMME BASE DE SYSTEME DE PRODUCTION VISANT LA SEQUESTRATION DU CARBONE¹

João Carlos de Moraes Sá¹, Carlos C. Cerri², Marisa C. Piccolo², Brigitte E. Feigl², Josiane Buckner³, Allison Fornari⁴, Márcia F.M. Sá¹, Lucien Seguy⁵, Serge Bouzinac⁵, Solismar P. Venzke-Filho², Volnei Pauledti⁶, Marcos S. Neto²

INTRODUCTION

La production agricole est la résultante de divers facteurs en interaction. Parmi eux, le sol est la ressource naturelle qui constitue le support des systèmes de production. Le mode de gestion des sols a comme principale finalité de fournir aux plantes les éléments de base pour leur développement, tels que l'air, l'eau et les nutriments. Ces composants sont sensibles aux actions qui sont réalisées sur la structure du sol. Cela signifie que les modifications d' "arrangement" des agrégats altèrent la porosité du sol avec des effets sur les flux d'air et d'eau. L'activité biologique réagit à ces changements en créant une réaction en chaîne qui modifie les flux d'énergie et le recyclage des nutriments.

Les sols du Brésil possèdent une énorme diversité de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Cependant, dans la majorité des régions mises en culture on peut affirmer que les sols sont originellement constitués d'argiles de basse activité, et présentent une acidité élevée liée à la présence d'aluminium toxique, ainsi qu'une pauvreté en bases échangeables et en phosphore. D'autre part, l'on peut aussi affirmer que, en général, ces sols possèdent un bon drainage naturel (pseudo-sables..) et peu de problème pour le développement de leur système racinaire.

L'objectif de cet article est de présenter un ensemble de résultats du projet intitulé "Dynamique de la matière organique en systèmes de mode de gestion du sol" initié en 1997 et développé par l'Université d'Etat de Ponta Grossa (UEPG) en partenariat avec le Centre d'Energie Nucléaire dans l'Agriculture (CENA) et plus récemment avec le CIRAD et la Fondation ABC. Durant cette période, trois thèses de doctorat et deux masters ont été soutenus. Ont été publiés divers articles scientifiques et quatre nouveaux masters sont en voie de réalisation.

LE SOL COMME SOURCE OU Puits (DRAIN) DU CO₂ ATMOSPHERIQUE

La matière organique du sol (MOS) est une composante-clé de tout écosystème terrestre et la variation dans sa distribution, son contenu et sa qualité a un important effet dans les processus qui se déroulent à l'intérieur du système. En fonction des modes de gestion adoptés, le sol peut agir comme source ou puits (drain) de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique, contribuant directement à l'effet de serre. Du point de vue agricole, le sol devient une source de CO₂ pour l'atmosphère quand les pertes par oxydation sont supérieures aux apports de carbone (C) sous forme de paille. Les modes de gestion qui emploient le travail du sol entraînent les plus fortes pertes. Les mécanismes impliqués dans ce processus sont les suivants: a) la rupture des agrégats expose la MOS qui agit comme agent de liaison entre micro agrégats, à l'attaque de la biomasse microbienne; b) le mélange de matériel organique frais avec le sol induit des conditions plus favorables à la décomposition; et c) accroissement d'activité de la biomasse microbienne dûe à une plus forte aération du sol et à l'augmentation de l'offre de C facilement oxydable, entraînant un flux plus important de minéralisation de C (Elliot, 1986; Powlson et al., 1987; Reicosky et al., 1995). La figure 1 illustre les pertes de C sous forme de CO₂ en raison de l'oxydation de la matière organique du sol (MOS) due au travail du sol associé à la monoculture en conditions climatiques contrastées. L'importance de ces pertes sera plus forte dans les milieux tropicaux et peut être 5 à 10 fois supérieure à celle des régions tempérées.

Référence Bibliographique: João Carlos de Moraes Sá¹, Carlos C. Cerri¹, Marisa C. Piccolo², Brigitte E. Feigl², Josiane Buckner³, Allison Fornari⁴, Márcia F.M. Sá¹, Lucien Seguy⁵, Serge Bouzinac⁵, Solismar P. Venzke-Filho², Volnei Pauledti⁶, Marcos S. Neto². O plantio Direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. Revista Plantio Direto. n.84, Novembro-Dezembro, p.45-61, 2004.

¹ Traduction du portugais par M Serge Bouzinac.

¹ Professeur du Département de Sols et Ingénierie Agricole, Cours d'Agronomie, Université d'Etat de Ponta Grossa, Av. Carlos Cavalcanti 4748, 84030-900, Ponta Grossa-PR, E-mail:jcmsa@uepg.br

² Université de São Paulo, CENA = Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Av. Centenário 303, 13416-970, Piracicaba-SP, Brasil

³ Thésard en Agronomie, Université d'Etat de Ponta Grossa, Av. Carlos Cavalcanti 4748, 84030-900, Ponta Grossa-PR

⁴ CIRAD – Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France

⁵ Ingénieur Agronome, Entreprise Agropastorale Lúcio Miranda, Av. Francisco Ribas 207, Ponta Grossa-PR

⁶ Fondation ABC, Secteur de Fertilité du Sol,

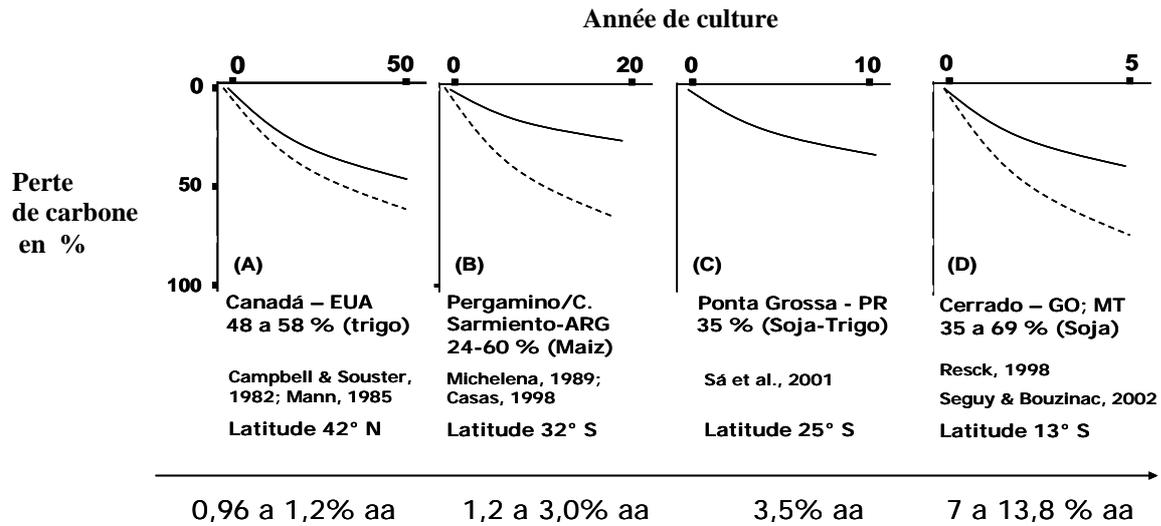


Figure 1. Réduction du contenu original de carbone liée au travail du sol conventionnel associé à la monoculture. Les lettres majuscules entre parenthèses correspondent aux localités où se déroulèrent les travaux (A) = Canada; (B) = Argentine; (C) e (D) = Brésil. Les nombres au-dessous de la flèche représentent les pertes annuelles (aa) de C liées au travail du sol.

D'autre part, le sol se comporte comme un puits de CO₂ atmosphérique quand les entrées de C sont plus élevées que les pertes par oxydation. Selon Bruce et al. (1999), pour que le sol se comporte comme un puits, il convient d'appliquer les "mesures" intégrées suivantes: a) élimination du travail du sol; b) intensification de l'utilisation de rotations de cultures; c) adoption de pratiques qui favorisent l'augmentation de productivité des cultures; et d) rétablissement de la couverture végétale permanente. La figure 2 illustre l'importance du Carbone en tant que composante centrale de stabilisation des agrégats et véritable pilier de la structure du sol.

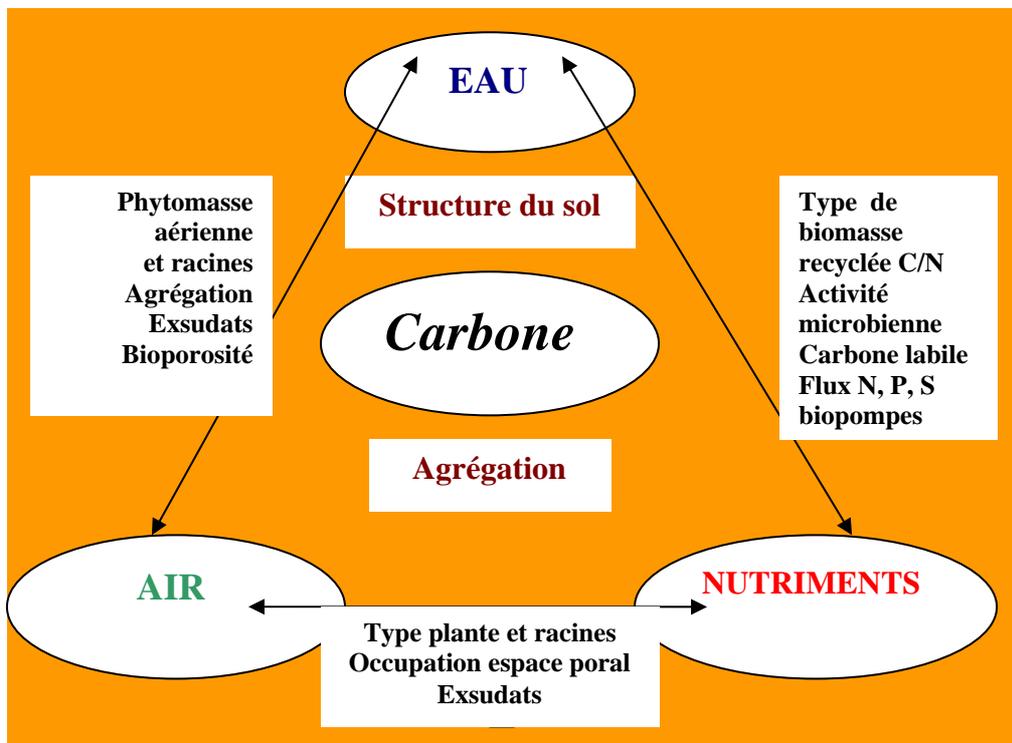


Figure 2. Interrelations du Carbone avec la formation des agrégats, la structure et les caractéristiques du sol.

Remarque : La participation du Carbone comme lien entre les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques dans les sols à charge variable et dépendant du pH est prépondérante. Il agit comme principal fournisseur de charges négatives, comme agent de liaison entre agrégats et comme substrat pour le développement et le maintien de la biomasse microbienne dans le sol.

Avancées scientifiques dans l'étude de la MOS

L'étude de la MOS a permis des avancées expressives dès les premiers travaux scientifiques datés du XVIII^e siècle et dans les derniers 150 ans de recherche, ces avancées ont été remarquables (Figure 3). Les changements dans les concepts de la MOS sont liés à l'évolution des méthodes d'évaluation dans diverses spécialités de la science (Christensen, 1992). L'évolution des connaissances en chimie a eu un fort impact sur les méthodes de recherche de la MOS, et de nombreux essais et efforts sur les bases théoriques ont été réalisés pour identifier sa structure (Kononova, 1961). Dans les 2 dernières décennies, les progrès dans l'instrumentation scientifique et la préoccupation croissante sur l'impact environnemental des systèmes agricoles, ont provoqué d'innombrables travaux se préoccupant de l'interaction entre les composants des compartiments du C organique du sol (Jenkinson & Ladd, 1981; Tisdall & Oades, 1982; Cerri et al., 1985; Elliot, 1986; Parton et al., 1987; Christensen, 1992; Cambardella & Elliot, 1994). Jusqu'à ce jour, deux lignes de pensée ont dominé l'étude de la MOS: a) ceux qui cherchaient à savoir ce qu'est la matière organique; et b) ceux qui étaient intéressés à étudier ce que fait la matière organique.

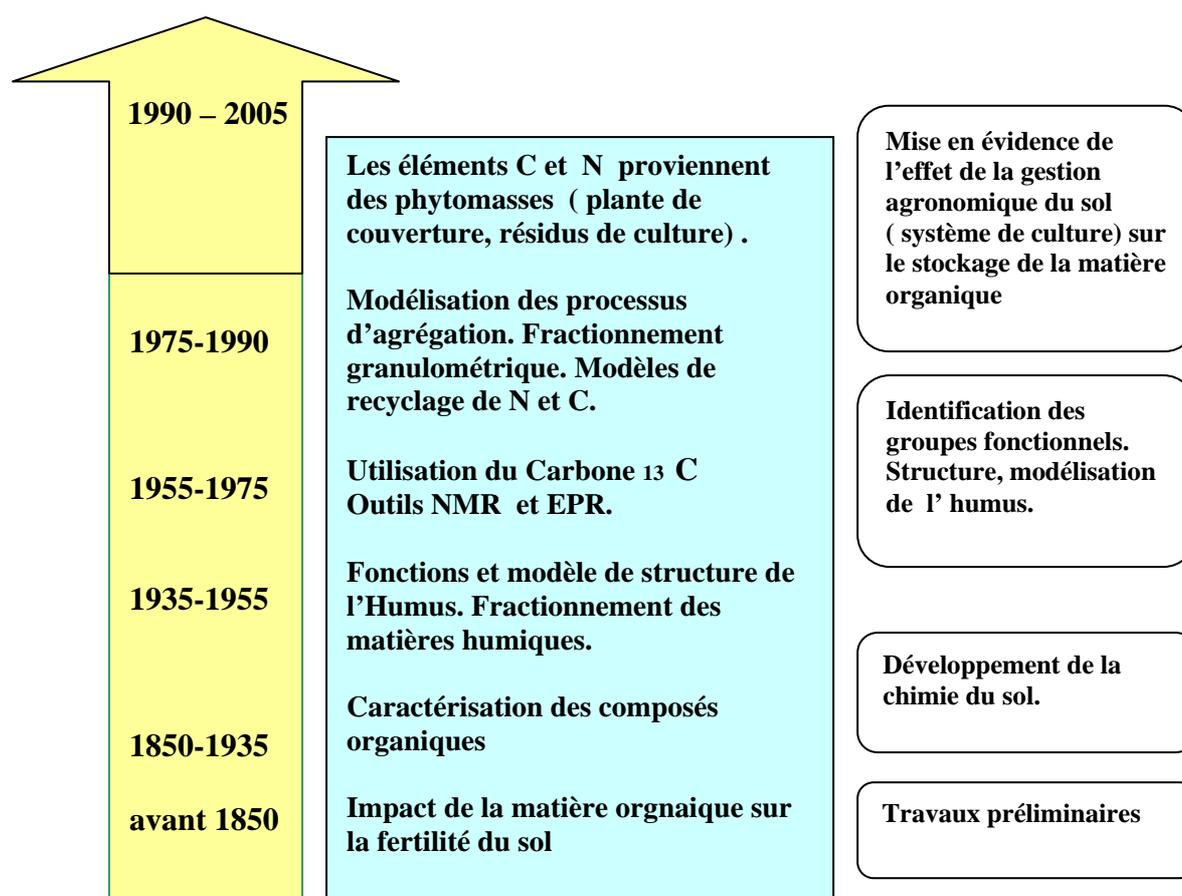


Figure 3: Evolution des études relatives à la matière organique du sol (MOS) depuis 150 ans.

Source: Kononova, 1961 ; Schnitzer, 1978; Jenkinson & Rainer, 1977; Cerri, 1986; Elliot, E.T., 1986 ; Balesdant et al. 1987 ; Parton et al. 1987; Duxbury et al., 1989; Jastrow, 1998

Commentaires :

Avec l'évolution des approches et de la pensée scientifique, de nouveaux défis autour de la compréhension de la dynamique de la MOS ont émergé avec l'apparition de très nombreux modèles qui évaluent le bilan de C et N dans le sol en prenant en compte l'évolution des compartiments de la MOS associée à diverses caractéristiques du sol. La compréhension des mécanismes et des processus de récupération de la MOS dans les systèmes de Semis direct sous *Couverture Végétale* est ainsi liée à l'altération des agrégats du sol libérant les composantes qui agissent comme stabilisateurs de la structure du sol. Ce qui caractérise la principale différence dans la structure du sol sous végétation naturelle comparée au système sous

préparation des sols et au Semis Direct est par suite l'altération des flux d'entrée et de sortie de biomasse et énergie (figure 4).

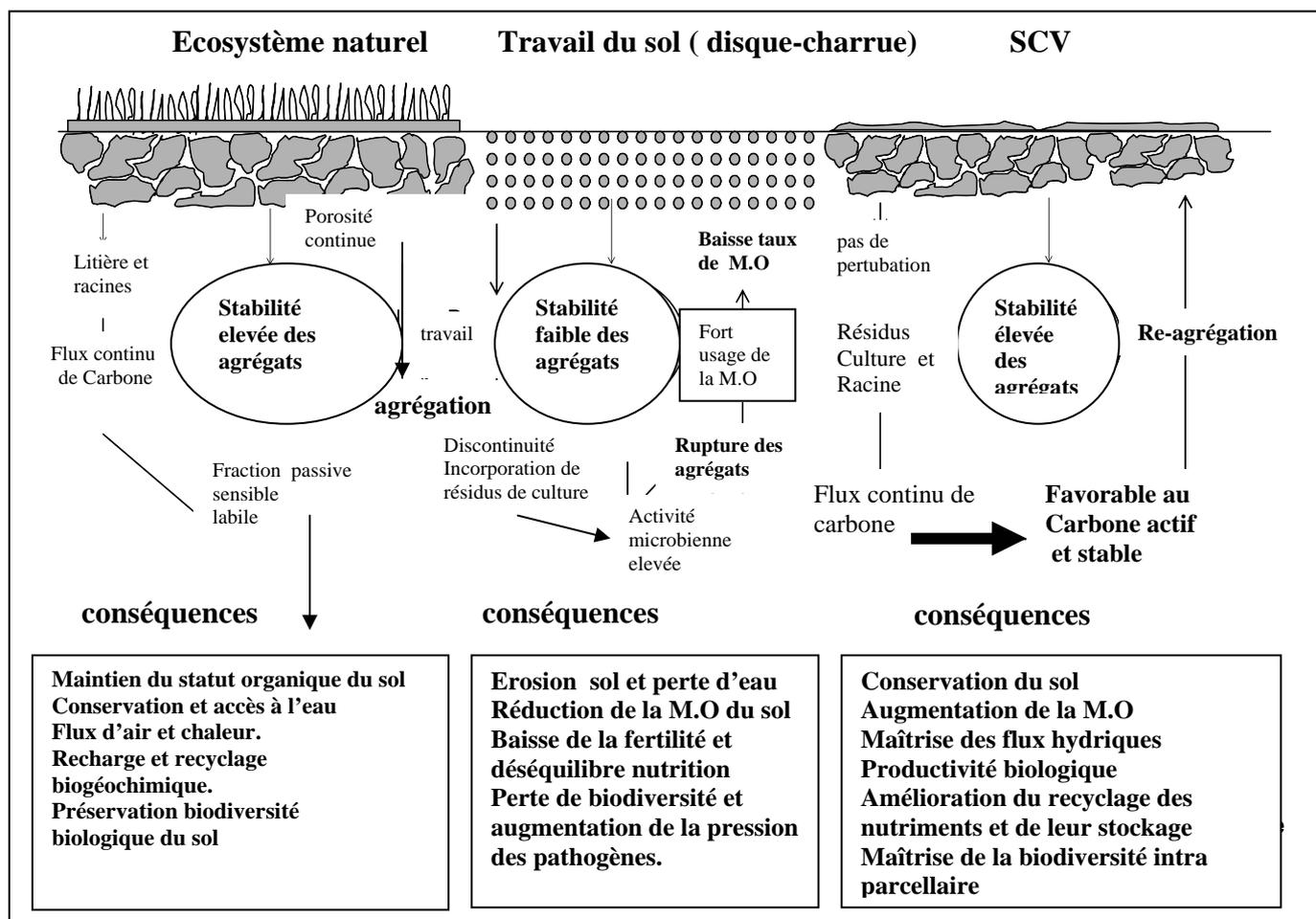


Figure 4. Flux de Carbone et altérations des caractéristiques du sol selon trois modes de gestion du sol.

Le point commun entre le système sous végétation naturelle et le Semis Direct SCV réside dans la préservation de l'unité de base du sol qui est l'agrégat. Le système avec travail du sol est alors caractérisé par la permanence d'une rupture constante des classes d'agrégats, les plus grands agrégats exposant les composés organiques responsables de la cimentation à la dégradation microbienne, qui dans ce contexte, est source d'instabilité.

L'autre différence réside dans la quantité et la qualité de C provenant des résidus de culture qui entrent dans le système SCV. Ceux-ci possèdent des caractéristiques différentes du système naturel avec des effets différents sur la recomposition des compartiments de la MOS.

Le résidu de culture « type » dans le SCV présente une quantité élevée de cellulose et une moindre quantité de lignine. Par suite, la vitesse de décomposition et le taux d'humification sont modifiés. Dans le système sous végétation naturelle, la diversité d'espèces ayant un plus grand nombre de composés organiques constitués de cires, corps gras, lignines et polyphénols induit un flux de C plus lent. Le tableau 1 illustre la séquence et la vitesse de décomposition des composés organiques provenant des résidus végétaux.

Dans le système SCV, les entrées de composés organiques sont plus intenses en raison de la rotation de cultures, avec prédominance de composés cellulosiques.

Cette "injection" de cellulose altère la diversité des agents de décomposition, stimulant particulièrement l'activité de microorganismes cellulolytiques. La décomposition lente et graduelle rétablit le flux continu de carbone, permettant ainsi la redistribution de composés organiques à différents stades d'humification dans les compartiments de la MOS.

Tableau 1. Vitesse de décomposition des composés organiques provenant des résidus végétaux.

Constituants organiques	Vitesse de décomposition
Sucres, amidon et protéines simples	<p>Rapide</p>  <p>Lente</p>
Protéines interstratifiées en polysaccharides	
Hemicellulose	
Cellulose	
Corps gras et cires	
Poly phénols et lignines	

Du point de vue du mode de gestion du sol, la suggestion de Duxbury et al. (1989) définit les différents stades de la dynamique du Carbone en quatre compartiments ou "réservoirs", ce qui permet de représenter les possibles changements causés par le mode de gestion:

- Le "Réservoir" *actif ou labile* – est constitué i) par des composés organiques facilement oxydables dérivés de fragments de végétaux récents ; ii) par la biomasse microbienne et les dépôts rhyzosphériques. Ce réservoir est principalement contrôlé par l'apport de résidus culturaux et par le climat. Il est fortement affecté par le mode de gestion du sol. Les modifications sont rapides et les quantités élevées de C et de N dépendent des transformations de la biomasse microbienne;
- Le "Réservoir" *lentement oxydable* est en relation avec les macro agrégats. Il est contrôlé par la minéralogie et par les facteurs agronomiques qui interfèrent dans l'agrégation. Parmi ceux-ci, les modes de gestion du sol affectent la taille de ce réservoir;
- Le "Réservoir" *très lentement oxydable* est en relation avec les micro agrégats et le facteur contrôleur est la stabilité de l'agrégat dans l'eau. Le mode de gestion du sol a un impact plutôt faible sur ce compartiment;
- Le "Réservoir" *passif ou récalcitrant* – est en relation avec le Carbone associé aux particules primaires du sol. Il est contrôlé par la minéralogie de la fraction argileuse. Il est constitué de complexes organo-argileux issus de la décomposition microbienne qui réduit le Carbone en formes élémentaires. Les modes de gestion du sol n'influencent pas ce compartiment.

Les systèmes de production à base de Semis direct sous Couverture Végétale et la séquestration du Carbone

Au cours des 10 dernières années, l'expansion des SCV au Brésil a été notable et la préoccupation de produire de la biomasse (paille...) grâce à des systèmes de rotation de cultures économiquement viables dans les diverses régions climatiques du pays a joué un rôle fondamental dans la stabilité du système agraire. La surface en SCV pour l'année 2003/04 est estimée à 21,86 millions d'hectares (FEBRAPDP, 2004) et la croissance annuelle entre 1992 et 2004 (FEBRAPDP, 2004) a été de 1,94 million d'hectares.

Ceci montre que le producteur, appuyé par la communauté scientifique, et stimulé par les filières de l'agrobusiness, a cherché à développer le Semis Direct en privilégiant les systèmes et les modes de gestion qui minimisent ses risques. Le défi actuel est de trouver le compromis entre la nécessité de produire beaucoup de phytomasse (plante, paille et racines) et celle d'assurer la viabilité économique du système dans l'objectif de garantir et d'améliorer la pérennité du système de production.

L'agronome remarquera que le temps de récupération de la MOS lorsque l'on passe du système avec préparation conventionnelle (PC) du sol, est étroitement lié au bilan de C, lequel est régi par la quantité et la qualité du matériel organique apporté à la surface du sol (Bayer et al. 2000; Sá et al., 2001 ; Ségy et al, 2004) à travers le système de culture.

Mécanismes et processus d'accumulation de C dans le Système Semis Direct

La décomposition des résidus culturaux libère des composés organiques, lesquels stimulent la formation et la stabilité d'agrégats (Tisdall & Oades, 1982; Six et al., 2002). La séquence proposée par Tisdall & Oades (1982) intègre le réservoir actif et stable de la MOS. Les racines, les hyphes de champignons et les exsudats des racines ont un rôle fondamental dans la réorganisation des particules primaires et micro agrégats dispersés. Ce modèle d'organisation des agrégats a servi de base à diverses études sur la compartimentalisation de la MOS (Figure 5).

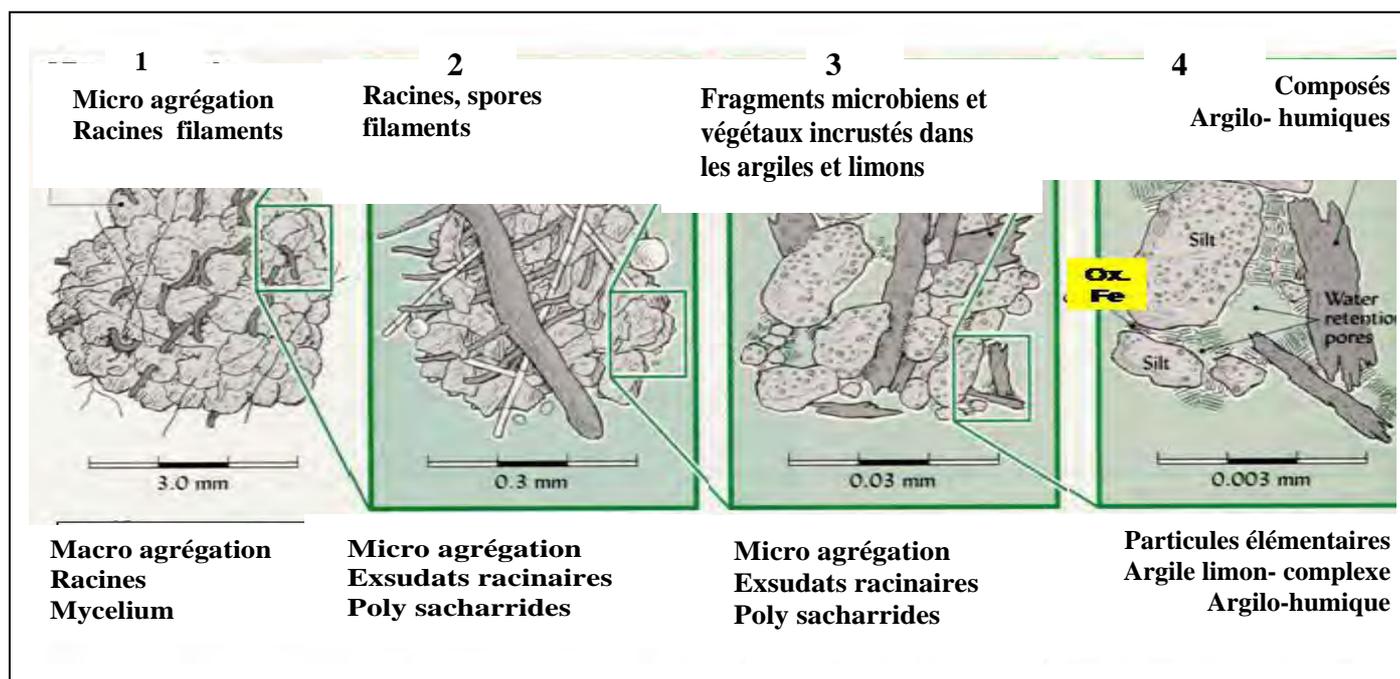


Figure 5. Séquence d'organisation et formation (1 à 4) de l'agrégat selon Tisdall & Oades, 1982.

Commentaires : Si le processus d'agrégation est continu, son taux sera directement proportionnel à la restitution de la matière organique (racines, tiges, feuilles, pailles) en quantité et qualité. L'impact de la préparation du sol influencera donc principalement les phases 1 et 2, causant une discontinuité du processus de transformation du compartiment actif avec une réduction du flux de C vers le réservoir stable de la MOS. D'autre part, en conservant racines et paille, la MOS se trouve moins exposée aux processus microbiens. Son taux de minéralisation est par suite réduit, ce qui entraîne un moindre flux de CO₂ vers l'atmosphère (Reicosky et al., 1995). Ce mécanisme favorise la protection physique de la MOS qui, se comportant comme agent de liaison entre les micro agrégats, contribue à la formation de macro agrégats (Six et al., 2002). La figure 6 illustre les étapes du processus d'agrégation dans le SPD.

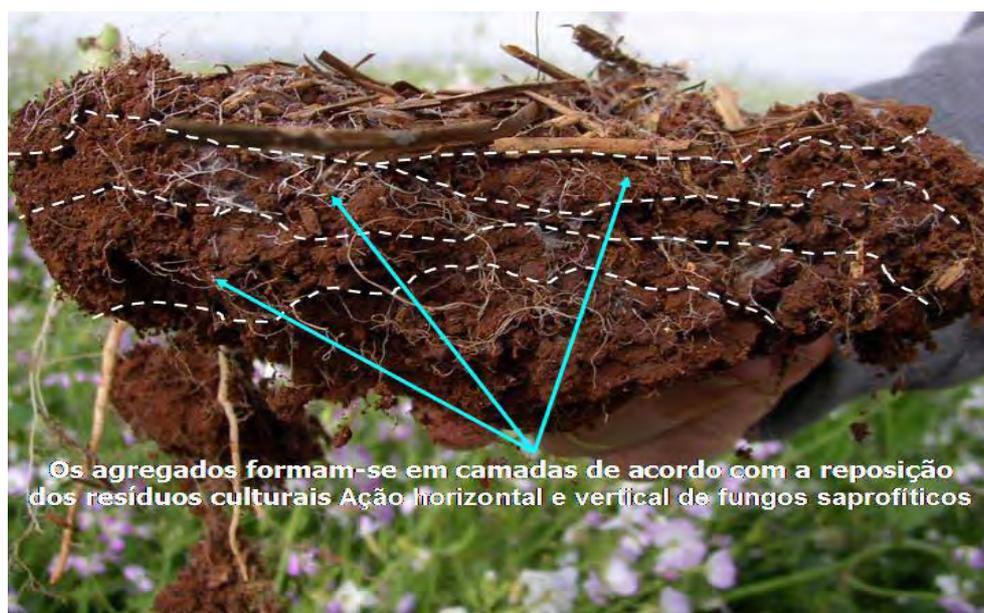


Figure 6 : Les agrégats se forment par couches en fonction du dépôt des résidus végétaux . On observe l'action verticale et horizontale des champignons saprophytes.

La formation d'agrégats dans le SCV est associée au taux de macro agrégation assurant la protection du C originaire du flux continu de la décomposition des résidus culturaux. C'est pourquoi le SCV stimule le regroupement entre particules primaires dispersées dans l'eau, micro agrégats, macro agrégats et les associations de microorganismes type saprophytes (figure 6). Le flux continu de C crée alors un front tampon grâce à la libération de sucres simples, protéines interstratifiées en polysaccharides, polyphénols et composés de lignine, au sein duquel la décomposition est active.

Cette fraction active de la MOS est particulièrement intéressante de par sa contribution à la fourniture de nutriments. Elle présente en effet une réponse plus rapide aux changements de mode de gestion du sol. En considérant ce point de vue, Bonde (1991) a montré que *le temps de retour* du C a été de 0,15 année dans deux sols sous climat tropical, alors que dans le sol sous climat tempéré, il a été de 2 ans. Dans les mêmes conditions tropicales, on observe que le réservoir actif de C a représenté 21 à 25% du C total alors qu'en conditions tempérées, il est situé à 6 %. **Cela signifie que dans les sols en climat tropical, le temps de retour du C a été 13,3 fois plus rapide et le volume du réservoir actif de C a été de 3,5 à 4,2 fois plus grand qu'en conditions tempérées.**

Cet exemple, comme bien d'autres, met ainsi en évidence l'important potentiel spécifique vis-à-vis du carbone de modes de gestion agricole appropriés en régions tropicales. On pourra en déduire en effet que dans ces conditions tropicales, le compartiment actif de C a deux fonctions bien identifiées : i) assurer l'alimentation en nutriments et, ii) fournir les composés organiques, agents d'agrégation du sol et de rétention de cations (Duxbury et al., 1989). La figure 7 illustre le flux de polysaccharides totaux dans le sol sur trois modes de gestion.

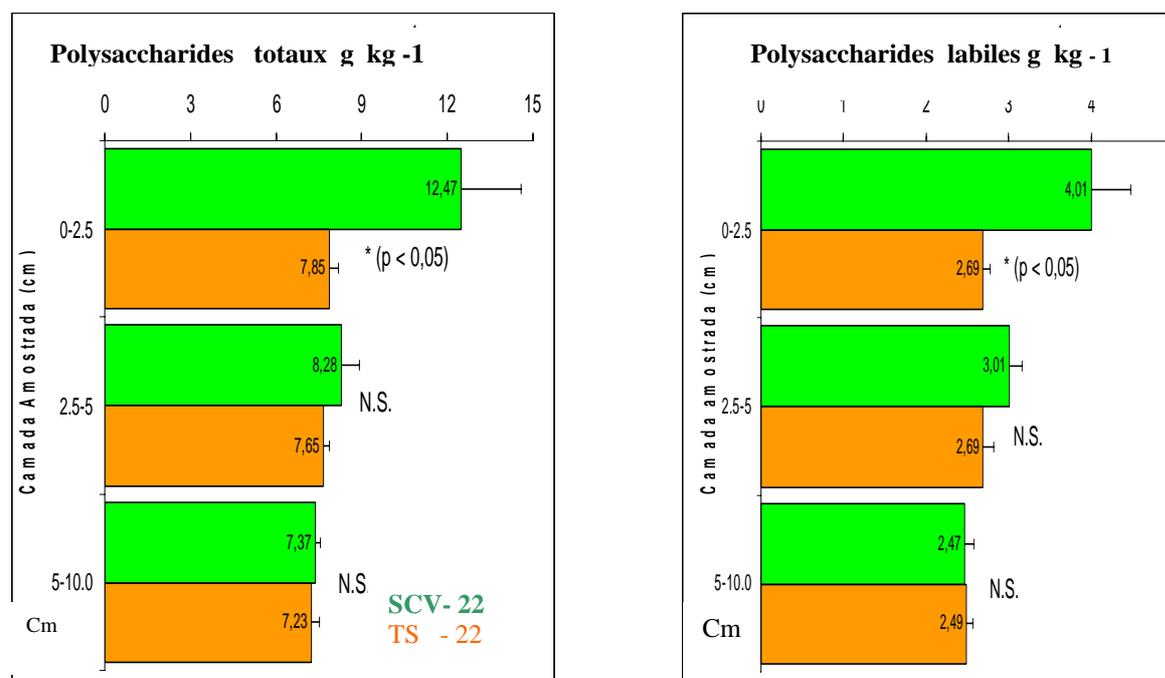


Figure 7 : Contenu en polysaccharides totaux et labiles dans le sol soumis à une longue période en Semis Direct (22 ans), ou à une longue période en travail conventionnel (TC22 = Travail du sol conventionnel sur 22 ans). Source: Sá, 2001

On remarquera que le contenu de polysaccharides totaux (POT) et labiles (POL) a été significativement supérieur dans le SCV-22 et a suivi l'augmentation du COT.

Le coefficient de corrélation linéaire entre l'addition totale de résidus culturaux et le contenu de POT ($r = 0,81^*$) et POL ($r = 0,82^*$) confirme les arguments précités.

L'analyse de corrélation (Tableau 2) entre les composantes de la matière organique MOS et la BMC (biomasse microbienne de C) et la BMN (Biomasse microbienne de N) , met en évidence des coefficients hautement significatifs, indiquant l'interdépendance entre ces variables. L'étroite relation entre le COD (carbone organique dissous) et la

biomasse microbienne est aussi applicable pour le COT. En réalité, le COD représente la source d'énergie rapidement disponible pour la biomasse microbienne.

En mode SCV, le COD provient de la libération de composés organiques durant la minéralisation des résidus culturaux (Staley et al., 1988).

L'argument ci-dessus peut être confirmé par le coefficient de corrélation entre l'addition annuelle de résidus culturaux dans les traitements en SCV et le COT ($r = 0,86^*$ dans l'horizon de 0-2,5 cm, et $r = 0,99^{***}$ dans l'horizon de 2,5-5 cm de profondeur).

La moyenne des coefficients de corrélation a augmenté en fonction du temps d'adoption du SCV, suggérant que ces facteurs sont dynamiques et subissent des modifications conjointes.

Ce fait devient notable pour la compréhension des mécanismes qui conduisent à l'accumulation de la MOS dans les SCV, dans la mesure où l'on sait que les polysaccharides possèdent une étroite liaison avec le niveau d'activité biologique dans le sol et avec la stabilité structurelle des agrégats (Greenland & Oades, 1975).

Tableau 2. Coefficient de **corrélation** de Pearson entre les composantes de la matière organique (N=25).

Paramètres Corrélés [§]	Traitements ^{##}				
	CN	PD-10	PD-20	PD-22	Média Trat. ¹
COT x BMC	0,76	0,85	0,85	0,93	0,83
COT x BMN	0,91	0,85	0,87	0,89	0,87
NT x BMC	0,75	0,85	0,86	0,93	0,83
NT x BMN	0,91	0,86	0,88	0,90	0,88
POT x BMC	0,60	0,68	0,87	0,83	0,74
POT x BMN	0,76	0,69	0,77	0,79	0,74
POL x BMC	0,63	0,83	0,83	0,88	0,77
POL x BMN	0,73	0,81	0,73	0,90	0,77
COD x BMC	0,90	0,92	0,98	0,94	0,93
COD x BMN	0,94	0,90	0,97	0,93	0,91
POT x COT	0,90	0,82	0,84	0,88	0,84
POT x NT	0,87	0,79	0,84	0,86	0,82
POL x COT	0,89	0,89	0,86	0,97	0,88
POL x NT	0,85	0,89	0,85	0,96	0,87
COT x COD	0,97	0,82	0,96	0,92	0,91
NT x COD	0,97	0,83	0,96	0,92	0,92
POT x COD	0,94	0,65	0,93	0,82	0,82
POL x COD	0,99	0,66	0,91	0,86	0,84
Moyenne ²	0,85	0,81	0,88	0,90	

[§] COT = Carbone organique total, NT = Azote total, BMC = biomasse microbienne de C, BMN = Biomasse microbienne de N, POT = Polysaccharides total, POL = Polysaccharides labiles, COD = Carbone organique dissous;

^{##} Dans chaque traitement (5 profondeurs x 5 répétitions, n = 25). Coefficients < 0,41 n'a pas de signification statistique; 0,41 à 0,55 (p = 0,05); 0,56 à 0,65 (p = 0,01); et > 0,66 (p < 0,001);

¹Moyenne traitement :représente la moyenne des coefficients des traitements pour chaque variable corrélée;

²Moyenne de tous les coefficients sur chaque traitement.

Source: Sá, 2001.

La rotation de cultures est la base de l'augmentation du stock de C et N dans les sols en Semis Direct

Passant du niveau « sol » au niveau « champ », on discutera ci après des résultats d'un essai de longue durée sur modes de gestion du sol (Ponta Grossa – Paraná).

Le non retournement du sol (ou non labour) et le maintien des résidus culturaux en surface pendant une longue période a entraîné un flux continu de C du réservoir actif vers le réservoir stable. Le stock de C ($\text{Mg ha}^{-1} = \text{ton ha}^{-1}$) en Semis Direct (SD) a été significativement supérieur à la préparation conventionnelle (PC) jusqu'à l'horizon de 0 – 10 cm et le stock total de C jusqu'à l'horizon de 0 – 40 cm a été de 118,4 pour le SD et 99,3 Mg ha^{-1} pour le PC (Figure 8). La différence entre le SD et PC a été de 19,1 Mg ha^{-1} en faveur du SD.

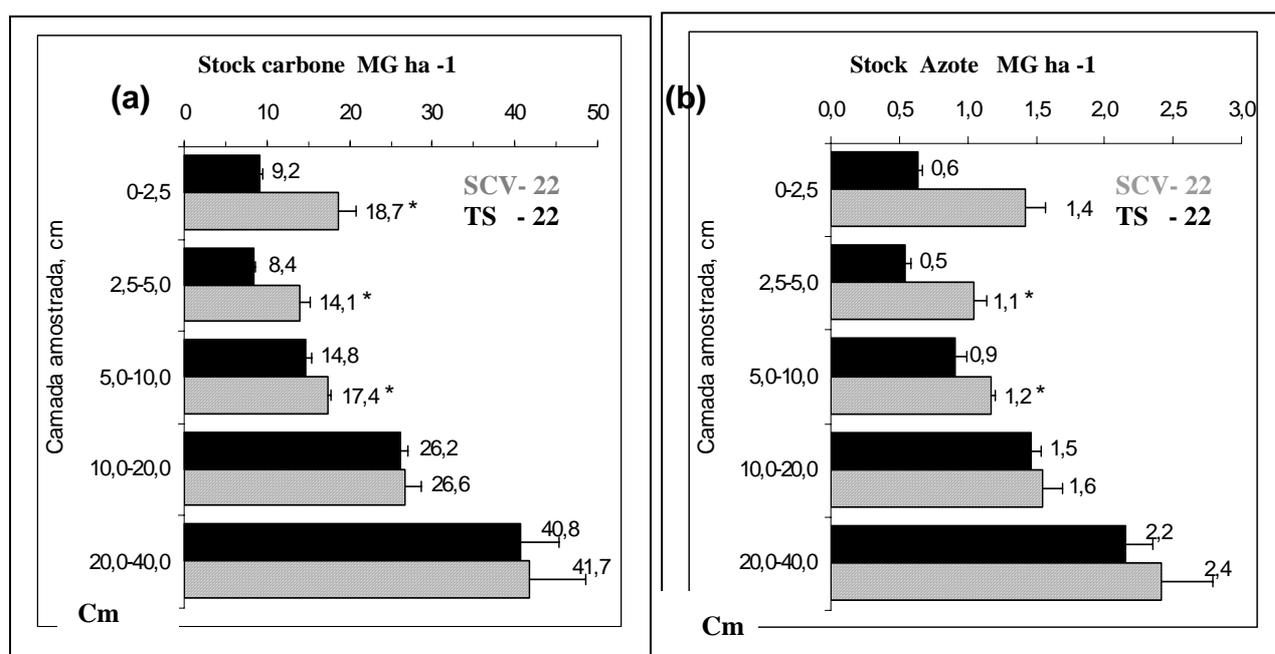


Figure 8 : Stock de carbone organique total (COT) et azote total (N) pour des sols ferrallitiques rouges, argileux, en semis direct sous couverture végétale morte depuis 22 ans (SCV-22) et en préparation conventionnelle depuis 22 ans (TS 22).

Les échantillonnés ont été prélevés sur 5 horizons. Les chiffres associés aux valeurs de stock représentent le stock dans chaque horizon échantillonné ainsi que l'écart - type par rapport à la moyenne. Les astérisques au côté des chiffres indiquent la différence significative entre les moyennes de stock du SCV 22 et du TS 22 par le test de Tukey à 5%.

Commentaires :

Les fractures systématiques des agrégats, spécialement des macro agrégats, provoquées par le travail du sol, n'existent plus en mode SCV ou sont restreintes à la ligne de semis, ce qui réduit l'exposition à une arrivée soudaine d' O_2 .

L'exposition de la MOS à l'attaque microbienne est réduite au minimum, ce qui permet aux agents d'agrégation de fonctionner comme des liants dans la formation de macro agrégats.

De cette manière, il est raisonnable d'émettre l'hypothèse bien que paradoxale d'un effet caché de l'augmentation de la densité du sol constatée dans ces sols légers soumis au mode SCV, lequel contre balance l'effet compactant lié au trafic de machines, combiné à l'absence de retournement du sol. En résumé, cette évolution de la densité contribue à la protection physique de la MOS dans ce mode de gestion du sol.

On citera pour exemple, un cas où le nombre annuel d'opérations mécanisées par hectare (15 et 17), aura contribué à la formation d'une architecture du sol avec des pores continus, favorisant l'existence de flux contrôlés de O_2 et de CO_2 (Reicosky et al. 1995) dans ces pores qui, à leur tour, influencent l'activité de la biomasse microbienne.

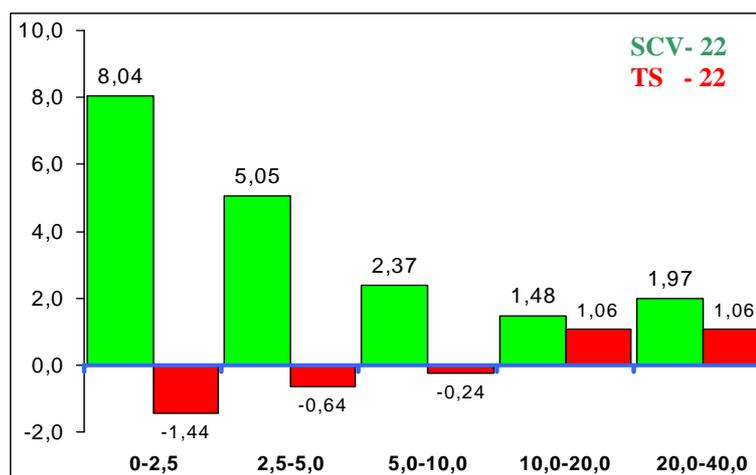


Figure 9 : Gains et pertes du stock de C (nombres au-dessus des barres) dans les horizons superficiels du sol (0-2,5; 2,5-5; 5-10 cm – au sommet) dans les traitements SCV 22 et TS 22 par rapport au stock de C sur sol originel (CN – ligne de référence horizontale : 0.0) .

On remarquera que les gains de COT en SCV ont lieu dans l'horizon (0–10 cm) et représentent 82% du total (Figure 9). A l'opposé, les pertes de COT sur travail conventionnel du sol sont de 97% sur ce même horizon (Sá, et al., 2002). On précisera que les moyennes des traitements à chaque profondeur ont été comparées par le test de Tukey à 5% de probabilité représenté par l'indicateur DMS_{0,05}.

Il est par suite logique d'en déduire que l'apport continu de résidus culturaux à rapports C/N contrastés favorise des flux différenciés de C et N. La figure 10 met en évidence ces arguments. Dans le cadre du déroulement des cultures, il est normal que des périodes avec un flux élevé de C et de N, alternent avec d'autres périodes où les flux de C et de N sont moindres. C'est cette variation dynamique qui induit l'accumulation de MOS, car elle est la cause d'une superposition en couches observée in situ de résidus en raison de la résistance différentielle à la décomposition des résidus ayant un rapport C/N plus ou moins élevé. L'apport continu de résidus culturaux à rapports C/N contrastés favorise des flux différenciés de C et N. La figure 10 met en évidence ces arguments. Donc, il y aura des périodes avec un flux élevé de C et de N, et d'autres ayant un flux moindre. C'est cette variation qui induit l'accumulation de MOS, induisant une superposition de résidus en couches en raison de la résistance à la décomposition des résidus ayant un rapport C/N élevé.

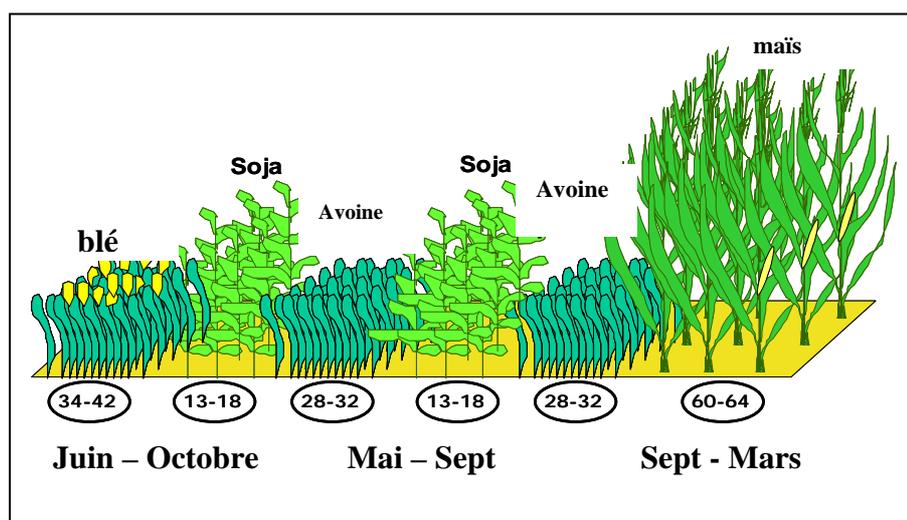


Figure 10 : Séquence de cultures, rapport C/N (nombres dans ellipse) et calendrier cultural (en gras, sous le rapport C/N).

La recomposition des compartiments de la MOS et la concentration de carbone (C) dans les fractions granulométriques de la MOS sont affectées par le travail du sol (Tab. 3).

TABLEAU 3. Concentration de C (g kg^{-1}) et stock de carbone (Mg ha^{-1}) dans les fractions granulométriques de la MOS dans l'horizon 0-10 cm en Semis Direct depuis 22 ans (**SCV-22**) et en Préparation Conventiionnelle depuis 22 ans (**TS-22**) dans la région des Campos Gerais, Paraná.

Horizon échantillonné (cm)	Fractions granulométriques (μm)	Mode de gestion du sol et de la culture			
		SCV-22	TS-22	SCV-22	TS-22
		----- g kg^{-1} -----		----- Mg ha^{-1} -----	
0 – 2,5	210-2000	39,3 A	16,0 B	4,77 A	1,69 B
	53-210	46,2 A	32,1 B	2,10 A	1,26 B
	20-53	72,1 A	48,0 B	2,08 A	1,40 B
	2-20	56,5 A	39,5 B	1,76 A	1,48 B
	0-2	61,0 A	44,5 B	5,93 A	4,24 B
2,5 – 5,0	210-2000	17,0 A	9,1 B	1,61 A	0,76 B
	53-210	37,4 A	28,4 B	1,84 A	1,31 B
	20-53	57,7 A	43,3 B	1,60 A	1,23 B
	2-20	49,4 A	45,5 B	1,55 B	2,59 A
	0-2	53,0 A	42,0 B	5,41 A	3,53 B
5,0 – 10,0	210-2000	7,5 ^{NS}	7,4	1,52 A	1,16 B
	53-210	24,5 ^{NS}	26,4	2,82 A	2,32 B
	20-53	40,5 ^{NS}	42,7	2,41 A	2,42 A
	2-20	42,6 ^{NS}	44,1	3,94 A	4,48 A
	0-2	45,0 ^{NS}	42,3	10,05 A	7,02 B
Stock (Horizon 0 – 10 cm)		-	-	49,39	36,89

Remarque : Les lettres majuscules correspondent à la comparaison des moyennes entre SCV-22 et TS-22 pour chaque fraction granulométrique de chaque horizon échantillonné. Source: Sá et al., 2001.

L'analyse du tableau 3 permet de signaler deux phénomènes remarquables :

a) la concentration et le stock de C augmente en allant vers les fractions plus fines, associées aux limons et aux argiles. Ceci montre que le processus d'accumulation de C est continu et commandé par les entrées de résidus cultureux;

b) en mode SCV, l'accroissement de C dans la fraction plus grossière (210-2000 μ) représente l'impact des résidus qui vont s'accumuler et se transformer en raison de l'activité de la biomasse microbienne.

La plus forte concentration de C dans les fractions labiles (2000-210 et 210-53 μm) observée sur Semis Direct (par rapport au travail conventionnel PC) indique que le sol se comporte comme un drain et va vers la séquestration du C. Ces arguments ont été confirmés grâce à l'utilisation de la technique isotopique du bilan de masse de l'isotope stable de C ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). La Figure 11 met en évidence la contribution des résidus cultureux sur le Semis Direct pratiqué sur une longue période.

Le stock de C dans les fractions granulométriques – effet du mode de gestion

Dans la fraction granulométrique plus grossière (210 – 2000 μm) de l'horizon de 0-2,5 cm, on peut affirmer que 100% du C provient des résidus cultureux et l'augmentation du COT à toutes les profondeurs échantillonnées est alors due aux fractions plus grossières (210-2000 μm) allant vers les fractions plus fines (< 2 μm) de la matière organique (Figure 11).

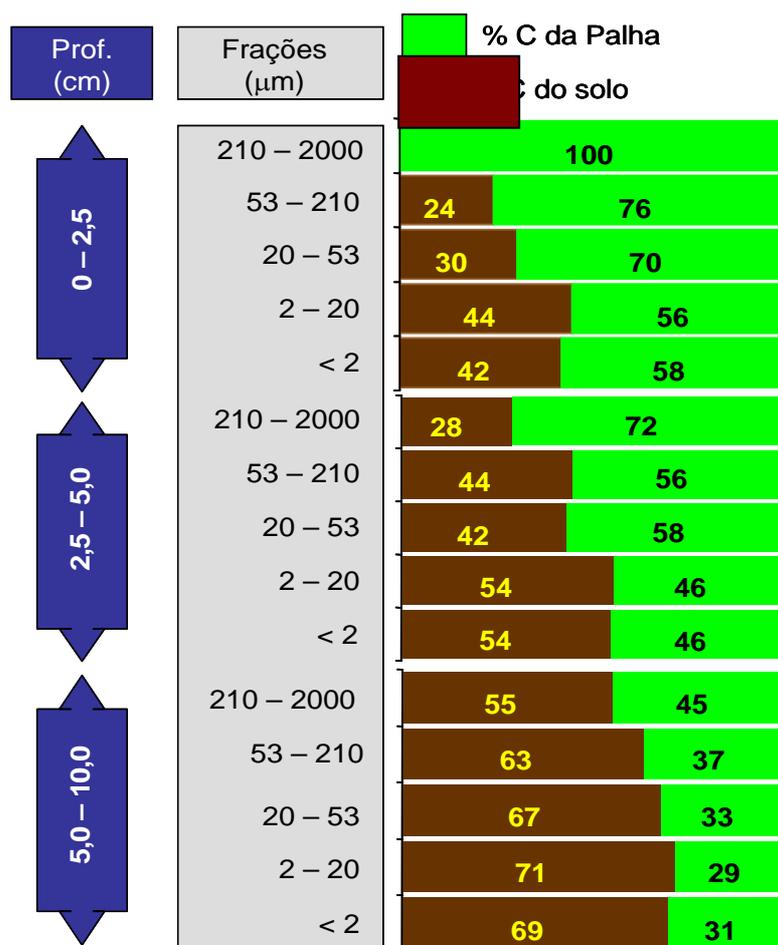


Figure 11 : Pourcentage de carbone issu des résidus culturaux et converti en carbone organique du sol (en vert) et C originel du sol (en marron) sur un sol ferrallitique en Semis Direct (SCV) depuis 22 ans. Les nombres dans les barres horizontales représentent le pourcentage de contribution des résidus et du sol.

Ce résultat peut indiquer l'existence d'associations qui forment des complexes de type "organo-limoneux" et "organo-argileux" (Feller, 1996). La matière organique dans les fractions granulométriques plus grossières fonctionne comme une source d'énergie pour la biomasse microbienne. L'échantillonnage dans les parcelles en Semis Direct d'un essai de longue durée sur mode de gestion du sol à la Fondation ABC a révélé dans l'intervalle d'un an des modifications marquantes dans ces fractions plus facilement oxydables (Tableau 4).

(cm)	Fractions Granulométriques (µm)	Parcelles en Semis Direct [†]	
		Temps 1 ^{††}	Temps 2
		----- g kg ⁻¹ -----	
0 – 2,5	2000 – 210	42,3	24,6
	210 – 53	39,6	38,5
	53 – 20	35,1	47,0
	< 20	26,9	36,7
2,5 – 5,0	2000 – 210	23,8	21,2
	210 – 53	30,8	31,6
	53 – 20	38,7	43,0
	< 20	30,6	41,2

[†] Temps 1 et 2 = correspondent à la collecte d'échantillons de sol en Septembre 2002 et Septembre 2003, respectivement.

La variation temporelle (T1 à T2) dans les fractions labiles (210-2000 et 53-210 μm) est plus forte sur le Semis Direct. Le stock de C est plus important dans les fractions plus humifiées que dans les fractions labiles. On note la réduction de la concentration de C dans les fractions labiles au temps T2. Au contraire, il s'est produit une augmentation dans les fractions plus humifiées (Figure 12). Ce qui confirme bien que la matière organique dans les fractions granulométriques plus grossières se comporte comme source d'énergie pour la biomasse microbienne et les composés organiques plus stables libérés de ce processus fonctionnent bien comme agents de liaison des fractions plus fines. Dans le même état d'esprit, Golchin (1994) a rapporté que le flux continu des composés organiques libérés durant la minéralisation des résidus culturaux en association avec l'activité des champignons du sol, peut conduire à la formation de complexes organo-minéraux stables. La tendance d'accumulation de C se fait des fractions plus grossières (210-2000 μm) vers les fractions plus fines (< 20 μm) de la matière organique (formation des complexes de type "organo-limoneux" et "organo-argileux"), preuve qu'en mode Semis Direct, le flux de C se dirige vers les fractions plus humifiées (20-53 et < 20 μm), ce que confirme l'observation répétée d'une concentration en C plus faible dans les horizons plus profonds.

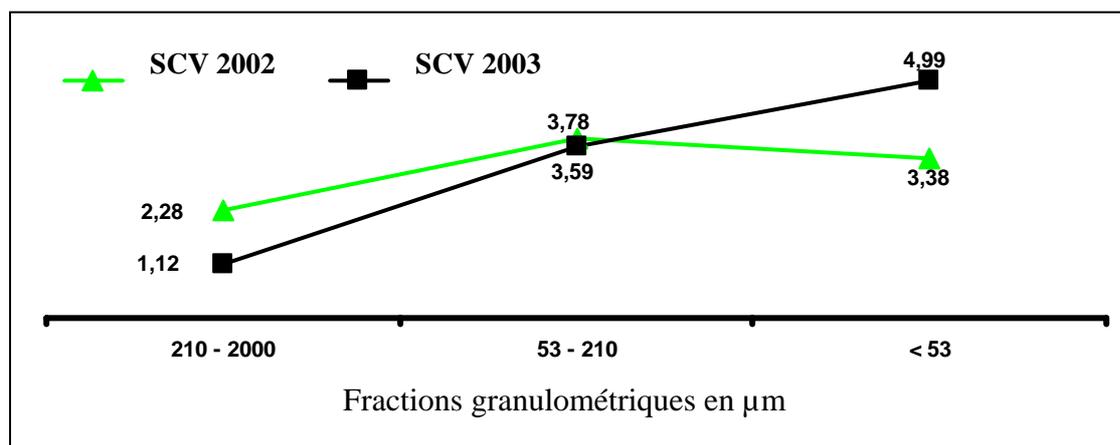


Figure 12 : Modifications du stock de C pour le mode SCV dans les fractions granulométriques (210 – 2000 μm , 53 – 210 μm et < 53 μm) dans l'horizon de 0-2,5 cm de profondeur à 2 époques d'échantillonnage (09.2002-03). Source: Buckner et al., 2004 (Données non publiées).

Il a été observé que le regroupement continu de micro agrégats et macro agrégats développe des micro-sites et/ou niches de colonies de bactéries et autres microorganismes entre les « plans de faiblesse » réduisant leur activité. Cela met en évidence que le SCV pratiqué durant une longue période associé à l'apport d'une quantité élevée de résidus culturaux (> 8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) conduit à la formation de complexes englobant les fractions 20-53 μm , 2-20 μm et < 2 μm . Ce mécanisme entraîne la protection du carbone organique. Selon Doran (1980), cette protection commence avec l'accumulation des hyphes de champignons lorsque les résidus culturaux sont maintenus en surface où la communauté microbienne est dominée par les champignons. De plus, des quantités élevées de polysaccharides sont sécrétées par les microorganismes et agissent comme un fort agent de liaison entre les particules primaires et les agrégats du sol.

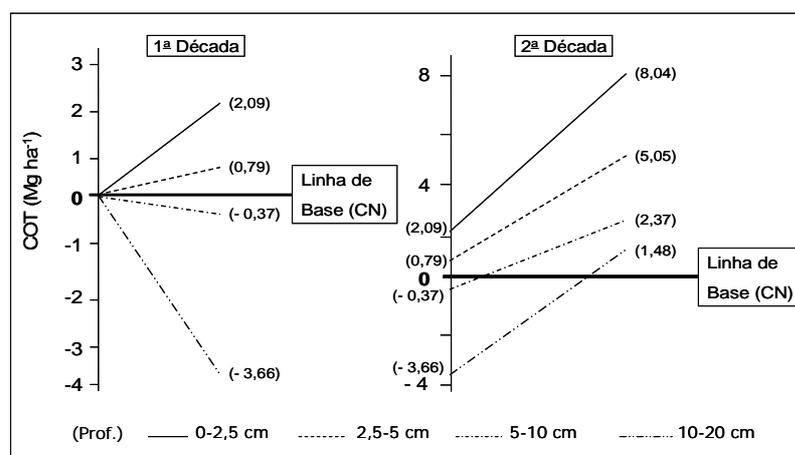


Figure 13 : Evolution du stock de C en fonction du temps d'adoption du SCV. La 1ª décennie montre le gain par rapport à la situation de végétation naturelle représentée par la ligne en gras au point zéro (ligne de base, CN = « Campo Nativo »). Les nombres entre parenthèses représentent les stocks de C dans chaque horizon. Source: Sá et al. 2001

La figure 13 montre les modifications dans le stock de C en fonction du temps d'adoption du SCV dans chaque horizon échantillonné comparé au sol originel du « campo nativo » (végétation naturelle de la région des Campos Gerais – la ligne de base en gras – représente le stock de C dans les horizons échantillonnés du « campo nativo »). Au cours de la première décennie, l'augmentation du stock de C s'est situé dans les 5 premiers cm de profondeur, alors que dans la seconde, on observe un fort accroissement dans les 10 premiers cm.

Ces flux continus de C résultant de la minéralisation et de l'humification des composés organiques sous le traitement SCV de longue durée, semblent être les facteurs-clé qui vont influencer sur les associations du C entre les agrégats et les fractions granulométriques de la MOS. Ainsi, le Semis Direct doit être « vû » comme un écosystème en raison des interactions entre les caractéristiques du sol qui sont plus importantes que l'effet isolé de chacun.

Les résultats obtenus par Venzke-Filho (2003) sur le flux de C et N microbien vient corroborer les affirmations ci-dessus (Figure 14).

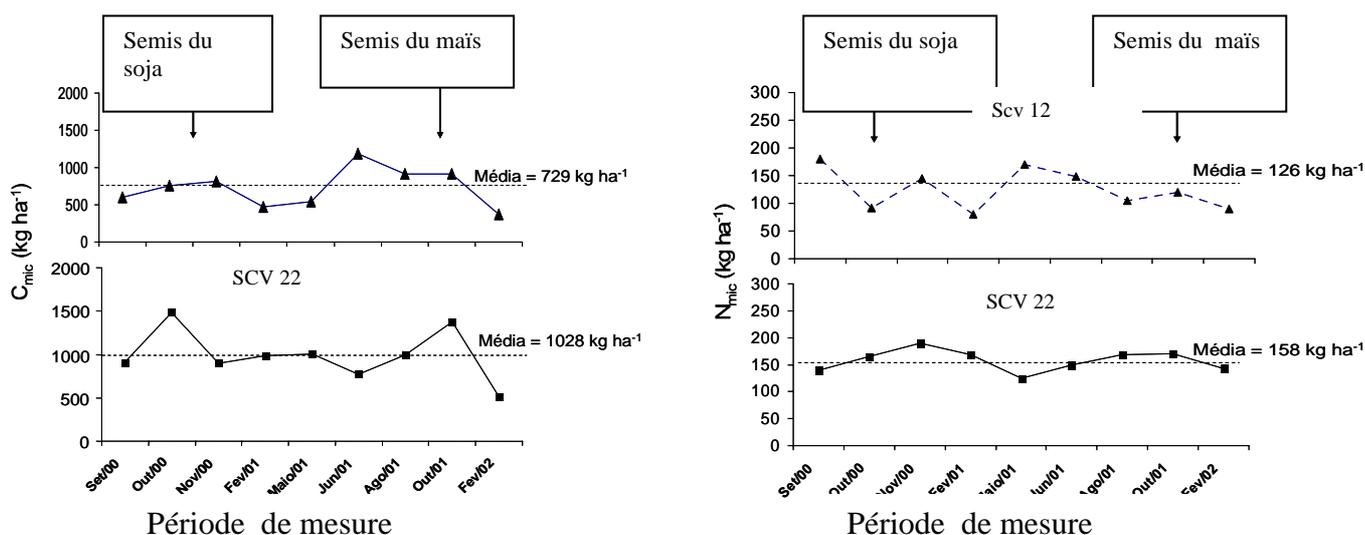


Figure 14 : Flux de carbone (C_{mic}) et azote (N_{mic}) dans la biomasse microbienne pour neuf époques d'échantillonnage sur deux parcelles en Semis Direct (SCV 12 = Semis Direct depuis 12 ans; SCV 22 = Semis Direct depuis 22 ans) sur la Fazenda Santa Branca, Tibagi-PR. Source: Venzke-Filho, 2003.

Au cours du temps, les modifications deviennent moins abruptes et le flux est plus constant. La différence moyenne du C_{mic} et du N_{mic} sur la parcelle en PD depuis 12 ans comparée à celle de la parcelle en PD depuis 22 ans a été de 298 et 32 kg ha⁻¹, respectivement.

D'un point de vue agronomique, ces valeurs sont importantes car elles témoignent de formes de N et C facilement utilisables par la plante.

En régions tropicales et subtropicales, malgré des taux de décomposition de la MOS de 5 à 10 fois plus élevés qu'en régions tempérées (Lal et Logan, 1995), les gains de MOS dus à l'adoption du SCV ont été similaires et/ou supérieurs.

La MOS suit donc une dynamique et divers modèles ont été utilisés pour décrire ses modifications dans le temps. La complexité des modèles varie d'un approche simplifiée et unicompartmentale comme la proposition de Henin & Dupuis (1945) aux modèles multicompartimentaux proposés par Jenkinson & Rainer (1977), Van Veen & Paul (1981), Janssen (1984) e Parton et al. (1987).

Selon Héning & Dupuis (1945), Greenland & Nye (1959), Greenland (1971), l'évaluation des modifications du C du sol par la fonction $dC/dt = -K_2C + K_1A$, est simple et reste un outil usuel pour la compréhension de l'impact de mode de gestion sur le Carbone du sol.

Dans ce modèle, dC/dt représente le taux de variation du Carbone organique du sol avec le temps, A est le taux d'apport annuel de Carbone dans le sol ($t\ ha^{-1}$), K_1 représente le coefficient d'humification du C organique, C est le carbone organique total du sol ($t\ ha^{-1}$) et K_2 est le taux d'oxydation annuel de Carbone ($t\ ha^{-1}$) propre à la décomposition et à la minéralisation.

La figure 15 présente les résultats obtenus (Sá et al., 2001), après adaptation du modèle unicompartimental de Hénin et Dupuis(1945) selon Greenland et Nye (1959). Cet exemple réalisé à Tibagi et Ponta Grossa-PR, montre qu'il est nécessaire d'avoir un apport minimum de **8,91 t/ha** de masse sèche ou **4,01 t/ha** de C grâce aux pailles afin de maintenir une équilibre stable. L'introduction de graminées dans les rotations de culture est par suite fondamentale pour garantir la durabilité (L. Ségué, 2004) du système.

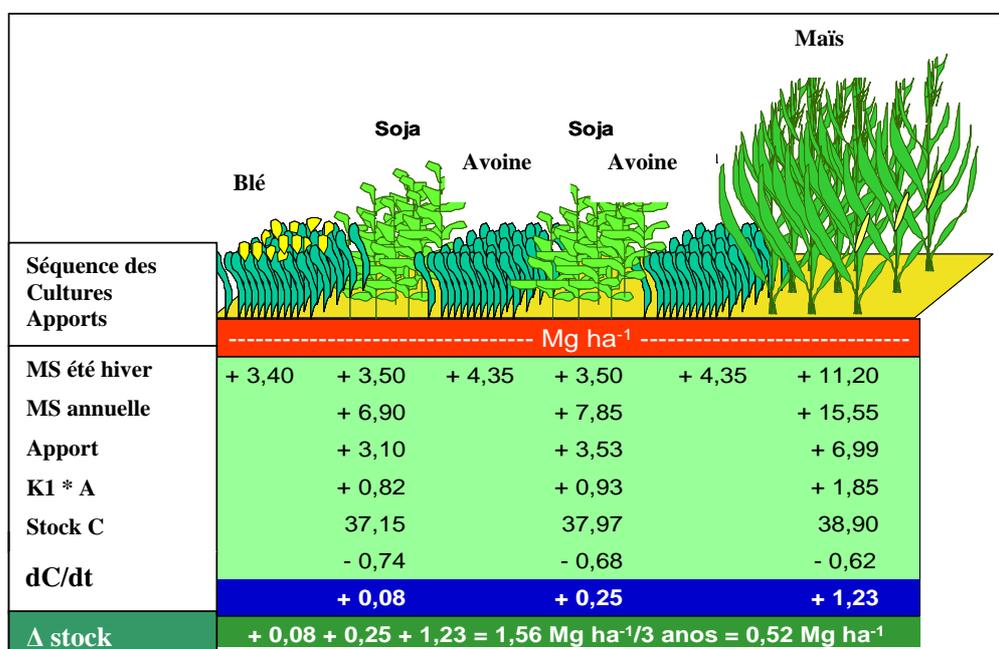


Figure 15 : Simulation du bilan de C dans le sol avec rotation de trois ans dans la région des Campos Gerais, Parana, sur une chronoséquence en SCV de longue durée. Considérant l'horizon de 0–20 cm et prenant comme base la parcelle en Semis Direct depuis 10 ans.

Commentaires sur la valeur des paramètres utilisés : $K_1 = 0,265$ (Sá et al., 2001); $K_2 = 0,020$; $0,018$; $0,016$ (adapté de Van Veen et Paul, 1981 et Bayer, 1996). On citera pour mémoire le calcul de la quantité minimale de masse sèche pour $dC/dt = 0$ (équilibre stable). Soit Apports – solde = $(3,10 - 0,08) + (3,53 - 0,25) + (6,99 - 1,25) = 12,04\ t / ha$ de C tous les 3 ans ou $4,01\ ts / ha$ de Carbone par an correspondant une transformation du Carbone organique à partir de la matière sèche de $4,01 \cdot 100 / 45$, soit **8,91 tonnes / ha de masse sèche**.

Si l'on considère et teste l'hypothèse du retrait de la culture de maïs de la rotation, le système SCV devient alors vulnérable sachant que le taux de séquestration suit la production de biomasse. Toute variation climatique qui réduit les apports de C pourra donc conduire à un bilan négatif.

En outre, si le semis d'avoine noire est réalisé à la volée et incorporé avec un outil de type offset léger, le bilan sera encore plus défavorable (tableau 5).

La perte totale de C liée au passage d'offset léger est de $0,90\ ton\ ha^{-1}$ alors que la récupération de C, au travers de la paille d'avoine noire, n'est que de $0,52\ ton\ ha^{-1}$, insuffisante pour remplacer la quantité de C perdu, engendrant le bilan négatif suivant : Apport = $4,35\ ton\ ha^{-1}$ de masse sèche d'avoine noire – partie aérienne + racine; pourcentage de C dans la masse sèche d'avoine noire = $45\% = 0,45$ pour un coefficient d'humification, $k_1 = 0,265$.

Soit le Bilan apparent : $0,9 \text{ ton ha}^{-1} - (4,35 \text{ ton ha}^{-1} \times 0,45 \times 0,265) = - 0,38 \text{ ton ha}^{-1}$

Le bilan de carbone est dans ce cas négatif, montrant que le semis d'avoine noire à la volée associé à l'utilisation de l'offset léger pour recouvrir les semences porte fortement préjudice au SCV et que ce type de semis à la volée doit être éliminé.

Tableau 5. Perte de C¹ dans les fractions granulométriques de la MOS > 53 µm après le passage d'offset pour recouvrir les semences d'avoine noire dans les parcelles en Semis Direct continu depuis 20 ans.

Horizon échantillonné (cm)	Stock de C ²		Δ (Perte de C) (T1 – T2)
	Temps 1 (T1) ³	Temps 2 (T2) ⁴	
	Mg ha ⁻¹		
0 – 2,5	4,64	3,99	0,65
2,5 – 5,0	3,14	2,89	0,25
Total	7,78	6,88	0,90

Commentaires de la légende :

¹ Il s'agit de la variation dans le stock de C de l'horizon de 0 – 5 cm pour les fractions granulométriques de la MOS > 53 µm (210 – 2000 µm et 53 – 210 µm) avant et 7 jours après le passage d'offset pour recouvrir les semences d'avoine noire.

² Calcul du stock de C: des échantillons non déformés sont retirés avec des anneaux d'acier pour détermination de la Densité du Sol (DS) et détermination de la concentration de C en g kg⁻¹ dans les fractions granulométriques > 53 µm avant le passage d'offset. Après 7 jours, on retire les échantillons déformés pour déterminer C dans les mêmes fractions granulométriques.

³ T1 – Collecte et détermination du stock avant le passage d'offset

⁴ T2 – Collecte et détermination du stock après le passage d'offset

Conséquences économiques pour l'agriculture au Brésil.

A partir d'une simulation appliquée aux scénari représentatifs des grandes options agronomiques discutées dans cet article, les relevés de la quantité estimée de biomasse recyclée annuellement montre l'évolution de la viabilité du système SCV dans les diverses régions du Brésil (Figure 16).

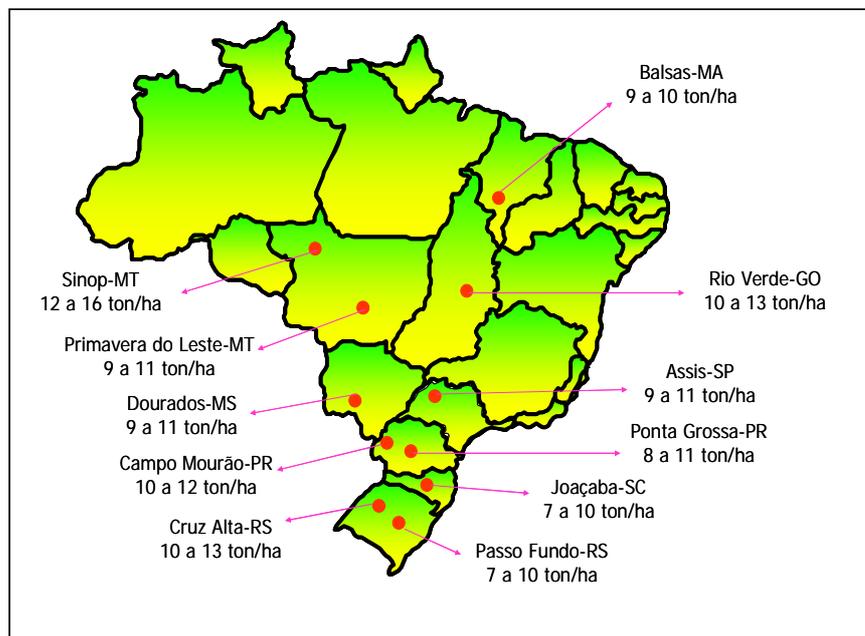


Figure 16 : Relevés de la quantité annuelle de biomasse recyclée à la surface du sol chez les producteurs qui ont adopté le SCV (semis direct avec rotation de cultures depuis une longue durée). Source: Sá et al., 2004

Les données de la figure 16 montrent clairement qu'il est possible en zone tropicale comme subtropicale de produire assez de matière sèche pour le maintien du système et l'accumulation de la MOS si l'agriculteur se consacre durablement à ce nouveau mode de gestion des cultures et du sol.

En régions tropicales où le taux de décomposition est élevé, la nécessité de développer des systèmes de production ayant une forte capacité d'apport de résidus cultureux est encore plus grande qu'en régions subtropicales.

L'évaluation de systèmes de production ayant un fort apport de résidus cultureux dans la région de Sinop-MT a montré que la récupération de la MOS originelle se produit sur une période courte (Séguy et al. 2001).

Dans ces régions, les travaux du Cirad ont montré en effet que l'on peut cultiver des espèces produisant de fortes biomasses dont le taux de croissance est compatible avec la combinaison des cultures économiques durant la saison des pluies (figure 17).

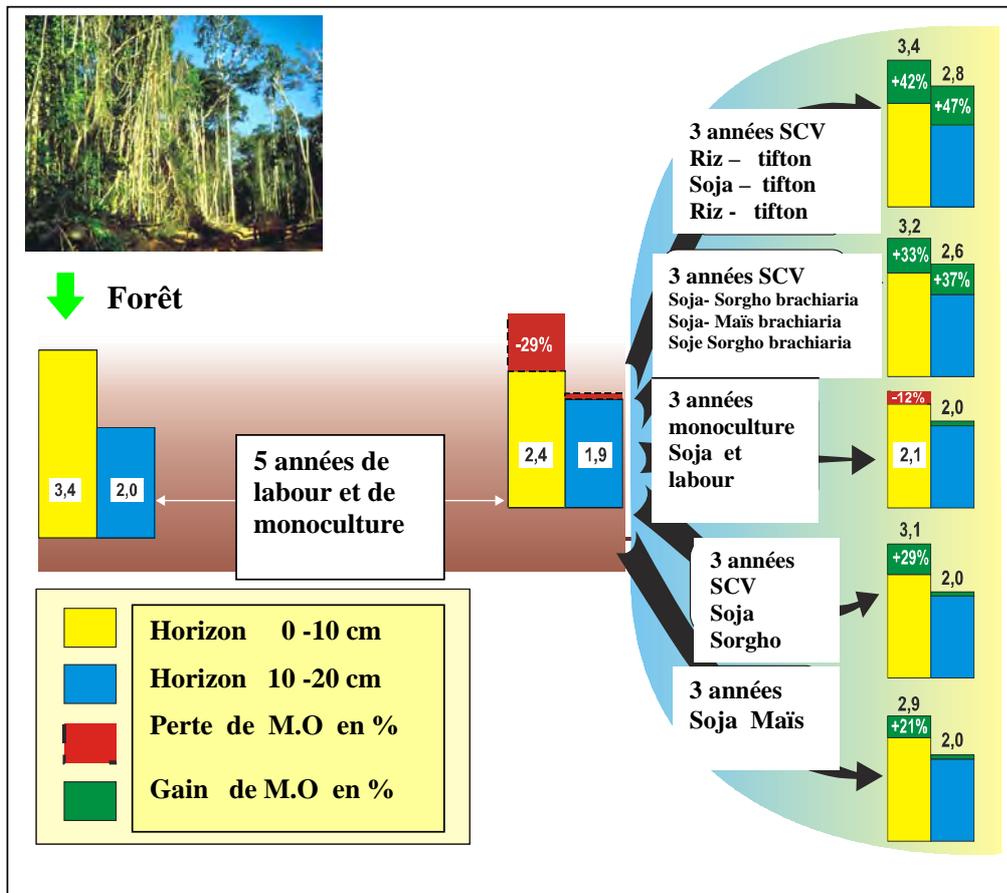


Figure 17 : Modification dans le contenu de la MOS affectée par les systèmes de production en mode SCV en région tropicale (Sinop - MT). Source: Séguy et al., 2001

La chute du contenu originel de MOS dans les 8 premières années, liée au travail du sol associé à la monoculture de soja a été supérieure à 40%. D'autre part, l'intensité de l'apport de résidus cultureux associée au Semis Direct a entraîné la récupération de la MOS.

En général, les légumineuses normalement utilisées pour former des couvertures vertes (pois, lupins, mucunas, crotalaires, stylosanthes, Cajanus et autres espèces), libèrent des quantités élevées de polysaccharides et amino-composés, facilement dégradables, alors que les graminées (maïs, sorgho, blé, seigle, Brachiaria, Eleusine et autres) sont riches en polyphénols et lignines plus stables.

Pour garantir de telles performances observées au champ (L. Séguy et al, 2002), l'hypothèse selon laquelle la combinaison des cultures en rotation comme base du SCV influence, au cours de la saison de culture, la formation de macro agrégats dans l'horizon superficiel semble ainsi fortement plausible, compte tenu des connaissances nouvelles acquises et discutées précédemment sur le fonctionnement de la matière organique dans ces systèmes.

Potentiel de séquestration de carbone des SCV au Brésil

Bien que 32% du stock de Carbone des sols du monde se trouvent en région tropicale (Eswaran, 1993; Batjes, 1996), la banque de données sur des essais de longue durée ainsi que les évaluations des stocks de carbone manquent encore d'informations validées. Dans les régions sub-tropicales et tropicales du territoire brésilien, les données sont encore embryonnaires et les projections sont limitées, spécialement par rapport à la diversité des systèmes de production. L'amplitude de variation des taux de séquestration de C se situe entre 0,99 Mg ha⁻¹ an⁻¹ (Sá et al., 2001) dans les régions sub-tropicales et 2,18 Mg ha⁻¹ an⁻¹ de C sur un Oxysoil en système SCV en zones tropicales du Cerrado brésilien (Corazza, 1999). Dans ces écosystèmes, avec introduction de l'éleusine en plante de couverture, le potentiel peut atteindre une année donnée 2,89 Mg ha⁻¹ an⁻¹ (L. Séguy, 2002). On citera ci après quelques données mesurées sur les taux de séquestration du carbone.

Tableau 6. Taux de séquestration de C dans diverses régions du Brésil

Prof. cm	Taux Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	Latitude	Longitude	Référence
0 - 20	0,51 a 1,84	12° 30' S	45° 30' W	Corazza et al., 1999
0 - 20	0,88	25° 20' S	50° 23' W	Sá et al., 2001
0 - 40	0,99	25° 20' S	50° 23' W	Sá et al., 2001
0 - 20	1,6	29° 30' S	53° 30' W	Amado et al., 1999
0 - 17,5	1,26	30° 50' S	51° 38' W	Bayer et al., 2000
0 - 10	1,45*	11° 40' S	55° 30' W	Seguy et al., 2002
0 - 10	2,89**	11° 40' S	55° 30' W	Seguy et al., 2002

* Système soja – mil en PD

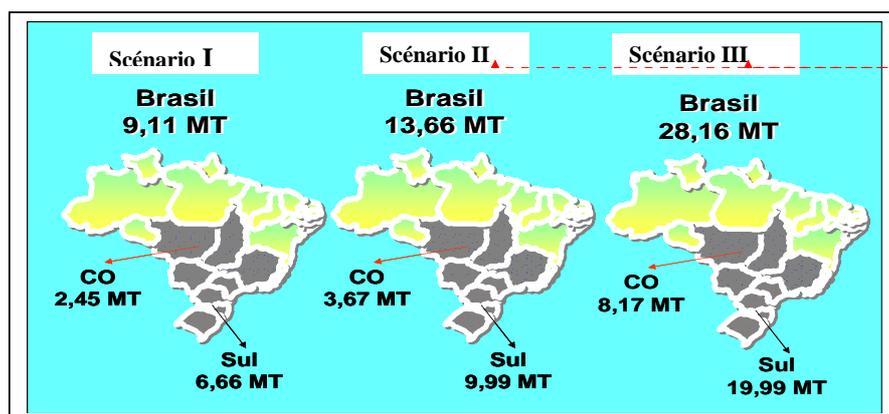
** Système Soja – Riz + Eleusine coracana

En se basant sur la superficie estimée par la FEBRAPDP (2004) pour l'année 2003-04 (21,86 millions d'hectares, dont 62% se trouvent dans la région sud et sud-est et le restant dans la région des Cerrados) et sur les données disponibles sur les taux de séquestration de C, il a été simulé 3 scénarios pour la séquestration de Carbone.

Scénario 1: Taux de séquestration annuel de 0,52 ton ha⁻¹ de C pour la région Sud, avec apport moyen de 10,1 t ha⁻¹ an⁻¹ de masse sèche sur moyenne de 10 ans en SCV . Taux de 0,25 t ha⁻¹ an⁻¹ pour la région tropicale et moyenne inférieure à 5 ans en SCV.

Scénario 2: Taux de séquestration annuel de 0,75 t ha⁻¹ de C pour la région Sud avec augmentation de la production de résidus culturaux de 20 à 30 %. Taux de 0,45 t ha⁻¹ de C pour la région des Cerrados avec augmentation de l'adoption de rotation de cultures sur 25% des terres.

Scénario 3: Taux de séquestration annuel de 1,50 t ha⁻¹ de C pour la région Sud avec des apports autour de 15 t ha⁻¹. Taux annuel de 0,55 t ha⁻¹ de C pour la région des Cerrados avec l'adoption de la rotation de cultures sur 50% des terres permettant des apports de biomasse supérieurs à 15 ton ha⁻¹.



Mis en forme : Police : 10 pt

Mis en forme : Police : 10 pt

Figure 18. Scénarios de potentiel de séquestration de Carbone (millions de tonnes) des SCV au Brésil.

CONSIDERATIONS FINALES

Ces résultats expérimentaux et ces observations en vraie grandeur montrent que le système SCV, soit le semis direct sans travail de perturbation du sol associé à la rotation de cultures combinées avec des plantes de couverture produisant en permanence de la phytomasse conduit le sol cultivé à fonctionner en mode puits (drainage) plutôt qu'en mode source (émission) de CO₂.

Au niveau global, ce service rendu à l'environnement ne pourra à terme être ignoré. A l'échelle locale, la protection de la MOS à l'intérieur de *néo-agrégats* constitue la *composante clé* générique de la *résilience* des systèmes SCV.

Pour l'agriculteur de demain au Brésil, la gestion de la Matière Organique du Sol peut raisonnablement être considérée comme la base d'une stratégie gagnante qu'autorisent ces modes de gestion des cultures dans la mesure où il a été démontré à grande échelle qu'ils assurent par ailleurs la viabilité et la durabilité de l'exploitation agricole.

Références bibliographiques

- Amado, T.J.; Pontelli, C.B.; Júnior, G.G.; Brum, A.C.R.; Eltz, F.L.F. & Pedruzzi, C. Sequestro de carbono de carbono em sistemas conservacionistas na Depressão Central de Rio Grande do Sul. In: V Reunión bienal de la red latinoamericana de agricultura conservacionista. p.42-43, Florianópolis, 1999. 57p
- Balesdent, J.; Mariotti, A.; Guillet, B. Natural ¹³C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies. *Soil Biology & Biochemistry*, v.19, p.25-30, 1987
- Batjes, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47:151-163, 1996.
- Bayer, C. Dinâmica da material orgânica em sistemas de manejo do solo. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. 240 p.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J.; Amado, T.J.C.; Martin-Neto, L.; & Fernandes, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Till. Res.* 54:101-109, 2000.
- Bonde, T.A. Size and dynamics of active soil organic matter fraction as influenced by soil management. Linköping: Linköping University, 1991. 34p. (Linköping Studies in Arts and Science, 63).
- Bruce, J.P.; Frome, M.; Haites, E.; Janzen, H.; Lal, R. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.54, p.382-389, 1999.
- Cambardella, C.A. & Elliot, E.T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:123-130, 1994.
- Cerri, C.C.; Feller, C.; Balesdent, J.; Victoria, R.; Plenecassagne, A. Application du traçage isotopique naturel en ¹³C, à l'étude de la dynamique de la matière organique dans le sols. *Comptes Rendu Academie Seances Paris, série II*, t.300, v.9, p.423-428, 1985.
- Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, v.20, p.2-90, 1992
- Corazza, E.J.; Silva, J.E.; Resck, D.V.S. & Gomes, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. *R. Brás. Ci. Solo* 23:425-432, 1999.
- Dick, W.A.; Blevins, R.L.; Frye, W.W.; Peters, S.E.; Christensen, D.R.; Pierce, F.J. & Vitosh, M.L. Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern Corn Belt. *Soil & Till. Res.* 47:235-344, 1998.

- Duxbury, J.M.; Smith, M.S.; Doran, J.W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: Coleman, D.C.; Oades, J.M.; Uehara, G. (Ed.) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu: University of Hawaii Press, NifTAL Project, 1989. p.33-67.
- Elliot, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633, 1986..
- Eswaran, H.; Van Der Berg, E. & Reich, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:192-194. 1993.
- Febrapdp - Federação brasileira de plantio direto na palha, 2004. Evolução da área de plantio direto no Brasil - dados estatísticos. <http://www.agri.com.br/febrapdp/pd> .
- Feller, C.; Albrecht, A.; Tessier, D. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.) Structure and organic matter in agricultural soils. Boca Raton: CRC Press, p.309-359. 1996.
- Golchin, A.; Oades, J.M.; Skjemstad, J.O; Clarke, P. Soil structure and carbon cycle. *Australian Journal of Soil Research*, v.32, p.1043-1068, 1994.
- Greenland, D.J. Changes in the nitrogen status and physical condition of soils under pasture, with special reference to the maintenance of the Australian soils used for growing wheat. *Soil Fertility*, v.34, p.237-251, 1971.
- Greenland, D.J.; Nye, P.H. Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *Journal of Soil Science*, v.9, p.284-289, 1959.
- Greenland, D.J.; Oades, J.M. Saccharides. In: GEISEKING, J.E. (Ed.), Soil components. New York: Spring Verlag, v.1, p.213-257. 1975.
- Henin, S.; Dupuis, M. Essais du bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*, Paris, v.15, p.17-29, 1945.
- Janssen, B.H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of "Young" soil organic matter. *Plant and Soil*, v.76, p.297-304, 1984.
- Jastrow, J.D.; Boutton, T.W.; Miller, R.M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.801-807, 1996.
- Jenkinson, D.S.; Ladd, J.N. Microbial in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E.A.; LADD, J.N. (Ed.) Soil biochemistry. New York: Marcel Decker, v.6, p.415-471. 1981
- Jenkinson, D.S.; Rayner, J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Journal of Soil Science*, v.123, p.298-305, 1977
- Konova, M.M. Soil organic matter: its nature, its role in soil formation and soil fertility. Oxford: Pergamon Press, 1961. p.13-45: The main stages in the history of soil humus study.
- Lal, R. & Logan, T.J. Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. p:293-307. In: Lal, R. Kimble, J.M., Levine, E. and Stewart, B.A. (ed.). Soil management greenhouse effect. CRC Press, Boca Raton, Fl., 1995.
- Lal, R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Progress in Env. Sci.* 4:307-326, 1999.
- Neufeldt, H.; Ayarza, M.A.; Resk, D.V.S. & Zech, W. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols. *Geoderma* 93:85-99, 1999.
- POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSEN, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, v.19, p.159-164, 1987.
- Reicosky, D.C.; Kemper, W.D.; Langdale, G.W.; Douglas Jr., C.L. & Rasmussen, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Cons.* 50:253-261, 1995.
- Sá, J. C. M., Cerri, C. C., Venzke Filho, S. P., Piccolo, M. C., Feigl, B. E., FELLER, C. Palha: a base de sustentação do sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*. Passo Fundo-RS, p.21 - 24, 2003.
- Sá, J.C. M., CerrI, C. C., Dick, W. A., LAL, R., Venske filho, S. P., Piccolo, M. C., Feigl, B. E. Carbon sequestration in a plowed and no-tillage chronosequence in a brazilian oxisol. p.466-471. In: D.E. Stott, R. Mohtar and G. Steinhardt (eds.). The Global Farm - Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, May 24-29, 1999, Purdue University, West Lafayette, Indiana,USA. 2001.

- Sá, J.C.M., Vieira, A. M., Bozza, D.L., Ahraus, S., Ferreira, A.O., Bueno, L., SÁ, M.F.M., Figueiredo, A. Schon, M. Nishikawa, M., Oliveira, J.A., Gonçalves, J.G. Avaliação do desenvolvimento radicular e atributos de genótipos de milho submetidos a níveis de palha no sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, n.80, 46-60, 2004.
- Sá, J.C.M.; Cerri, C.C.; Lal, R.; Dick, W.A.; Venzke Filho, S.P.; Piccolo, M. & Feigl, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* V.64:1486-1499, 2001.
- Séguy L. , Bouzinac S. Groupe MAEDA et AGRONORTE. 2002. Rapports annuels d'activité Groupe MAEDA/CIRAD-CA et AGRONORTE/CIRAD-CA. Doc. Interne CIRAD-CA/GEC 34398 Montpellier Cedex 5 - França.
- Séguy L. , Bouzinac S. , Maronezzi A.C. 2001,a. Um dossiê do plantio direto : Sistemas de cultivo e dinâmica da matéria orgânica - 203p. (*existe em francês e português*). Doc. Interne et CD-Rom CIRAD-CA/GEC 34398 Montpellier Cedex 5 - França.
- Six, J., Feller, C., DENEF, K., OGLE, S.M., SÁ, J.C.M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils; effect of no-tillage. *Agronomie*, v.22, p.755-775, 2002.
- Schnitzer, M. Humic substances: chemistry and reactions. p. 1-64. In: M. Schnitzer, S.U. khuan, (eds). *Soil organic matter*, Elsevier Scientific Publishing Company. P.O Box 211, Amsterdam, The Netherlands, *Developments in Soil Science*, 1978. p. 320.
- Staley, T.E.; Edwards, C.L.; Scott, C.L.; Owens, L.B. Soil microbial biomass and organic component alterations in a no-tillage chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.998-1000, 1988.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J.Soil Sci.* 33:141-163, 1982.
- Van Veen, J.A.; Paul, E.A. Organic carbon dynamics in grassland soil. I. Background information and computer simulation. *Canadian Journal of Soil Science*, v.61, p.185-201, 1981.
- Venzke-Filho, S. P. Biomassa microbiana do solo sob sistema de plantio direto na região dos Campos Gerais, Tibagi, PR. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003. 99 p.