

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE AGRONOMIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**CIÊNCIA DO SOLO**

**TESE**

**Estoque de Carbono em um Sistema Agrícola do  
Pampa Argentino**

**Alejandro Oscar Costantini**

**2003**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTOQUE DE CARBONO EM UM SISTEMA AGRÍCOLA DO PAMPA  
ARGENTINO**

**ALEJANDRO OSCAR COSTANTINI**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Helvécio De-Polli**

*e Co-orientação do Professor*  
**Roberto Oscar Pereyra Rossiello**

Tese submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de **Philosophiae  
Doctor** em Agronomia, Área de  
Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2003

**Verificar na Biblioteca Central**

.....

.....

Costantini, Alejandro Oscar

Estoque de carbono em um sistema agrícola do Pampa argentino. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Agronomia. Ano 2003. n° f:

il.....

Orientador:

I. Helvécio De-Polli. II. Embrapa – CNPAB/LABEX. III. Ph. D.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

ALEJANDRO OSCAR COSTANTINI

Tese submetida ao Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do grau de **Philosophiae Doctor**, em Agronomia

TESE APROVADA EM 24/02/2003

---

Roberto Oscar Pereyra Rossiello. Dr. UFRRJ

---

Lúcia Helena Cunha dos Anjos. Ph.D. UFRRJ

---

Gabriel de Araújo Santos. Ph.D. UFRRJ

---

Bruno José Rodrigues Alves. Dr. Embrapa - Agrobiologia

---

Pedro Luiz O. Almeida Machado. Ph.D. Embrapa - Solos

---

Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto. Ph.D. Embrapa - Agrobiologia

## AGRADECIMENTOS

São inúmeros os agradecimentos que eu tenho para fazer. Acho que poderia escrever quase tanto como no corpo da tese.

Desejo fazer um agradecimento em geral aos Pesquisadores e técnicos da EMBRAPA – Agrobiologia e aos Professores do Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela excelente disposição que sempre tiveram para comigo.

A seguir, gostaria de fazer alguns agradecimentos especiais, para:

- Meu orientador, Dr. Helvécio De-Polli, pelo estímulo para continuar com meus estudos de pós-graduação depois de me orientar no mestrado, e me ajudar tanto com a realização deste trabalho, e o mais importante, ajudar a minha formação em geral.
- Ao Dr. Roberto Oscar Pereyra Rossiello, quem sempre teve uma solução para cada um dos problemas que iam acontecendo no decorrer dos meus estudos. Agradeço ele sua disposição e amizade sincera. Seria difícil imaginar chegar até aqui sem sua presença.
- Aos meus Professores no curso, Dr. Gabriel de Araújo Santos e Dr. Ricardo L. L. Berbara pela ajuda que sempre me deram, seja estando eu no Brasil como na minha terra.
- Aos Pesquisadores da EMBRAPA – Agrobiologia Dr. Segundo Urquiaga e Dr. Dejair Lopes de Almeida, pela ajuda recebida em diferentes momentos dos meus estudos.
- Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda na Argentina do Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup>. Carlos Galarza, do INTA Marcos Juárez e do Técnico de Laboratório da Cátedra de Edafologia da Faculdade de Agronomia da UBA, Sr. Eduardo Vella. A eles, muitíssimo obrigado.
- Agradeço muito à Faculdade de Agronomia da Universidade de Buenos Aires que financiou mediante o FOMEC o início dos meus estudos, e à paciência das Autoridades da Faculdade para me substituírem nas minhas ausências da Argentina.
- Obrigado meu amigo, Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup>. Diego Cosentino, por me cobrir em cada espaço que eu deixava vazio por as minhas obrigações. Agradeço à Lic. Cristina Plencovich por ter feito a tradução do resumo, mais acima disso, por ter sido fonte de ajuda e estímulo desde o tempo que a conheço. Agradeço também a ajuda brindada pela Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup> Valeria Schindler na análise estatística e nas consultas que me respondeu após a defesa, além do apoio que sempre tive dela no decorrer dos estudos. Obrigado Prof. Marta Conti pelo encorajamento de sempre. Obrigado aos meus orientados, o Lic. em Economia e Administração Agrária, Rosendo Lago e a ‘quase’ Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup>. Romina Romaniuk.
- À CAPES e SECyt pelo projeto BR 26/00 que colaborou muito com a troca de informações.
- Ao Sr. Newton Gonçalves Salgado e sua família pelos 10 anos de amizade que me brindaram desde a primeira vez que eu cheguei em Seropédica.
- Ao Sr. Nilson Brito de Carvalho e colaboradores da Secretaria do CPGA-CS pela ajuda brindada em todo momento dos meus estudos.
- Ao Sr. Roberto Gregio e colaboradores do laboratório da EMBRAPA – Agrobiologia, pela realização das análises de <sup>13</sup>C e a ajuda brindada.
- Finalmente, deixo este parágrafo para esse monte de amigos-colegas que tive a sorte de fazer no Brasil e que me fizeram sentir como em casa cada vez que andei por esse maravilhoso país. Obrigado Felipe Brasil, que também me ajudou na correção

gramatical. Obrigado meus amigos Eli Lino de Jesus, Adriano Perin, Fernando Guridi, Luciano Canellas, Márcio Pimentel, Enderson, Jéssika, Jerri, Teresinha Paciello, Diego, Júlia, Fabiano, Cláudia, Elvino. Minhas desculpas para outros que não tenha nomeado, mas felizmente foram muitos, e é bem provável esquecer um nome no momento de escrever os agradecimentos. Tomara algum dia possa recebê-los na Argentina e retribuir somente um pouco de todo o que me deram.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>   | 1  |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>  | 3  |
| 2.1. Balanço Global de C e a Matéria Orgânica do Solo  | 3  |
| 2.2. Práticas Agrícolas e Balanço de C   | 4  |
| 2.3. Caracterização da Região do Pampa Argentino   | 11 |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>   | 14 |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>   | 27 |
| 4.1. Conteúdo de Carbono Orgânico Total no Solo  | 27 |
| 4.2. Conteúdo de Carbono Potencialmente Mineralizável no Solo                                  | 28 |
| 4.3. Rendimento da Cultura de Milho em Matéria Seca Total e em Grão                            | 30 |
| 4.4. Liberação de CO <sub>2</sub> do Solo  | 31 |
| 4.5. Cálculo do Estoque de Carbono no Solo   | 34 |
| 4.6. Comparações com as Pastagens  | 36 |
| 4.7. Confeção do Balanço de Carbono  | 38 |
| 4.8. Estoque de C em Solos sob Monocultura e Rotações, e Principais<br>Origens desse Elemento. | 41 |
| <b>5. CONCLUSÕES</b>   | 48 |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>   | 49 |
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>   | 51 |

## RESUMO

COSTANTINI, Alejandro Oscar. **Estoque de carbono em um sistema agrícola do Pampa argentino**. Seropédica: UFRRJ, 2003. 56p. (Tese, Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo)

Este trabalho foi realizado em parcelas experimentais estabelecidas em Marcos Juárez, Centro da Argentina, na região do Pampa. Os solos são CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS (Argiudols típicos), com alto conteúdo de silte como característica principal. Em primeiro lugar, foram estudados, sob a rotação milho – trigo/soja – soja, os efeitos de dois sistemas de preparo de solo (preparo reduzido e plantio direto) sobre os teores de carbono orgânico total, carbono potencialmente mineralizável, C liberado por respiração no campo e estoque de carbono que apresentava a camada superficial, visando fazer um balanço de C. Não houve diferença estatisticamente significativa para os conteúdos percentuais de carbono orgânico total. No entanto, existiram diferenças no C-CO<sub>2</sub> evoluído do campo, que, entretanto, não se refletiram no estoque de carbono no solo. O balanço de carbono apresentou-se como ligeiramente favorável para o plantio direto, mostrando uma diferença de C no estoque do solo, ou daquele não evoluído de 1,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Em outro ensaio no mesmo local, estudou-se o efeito dessa mesma rotação comparado à monocultura de milho, para testar, agora até 0,9 m de profundidade, o estoque de carbono e a origem da matéria orgânica do solo, com a técnica de marcação natural com o isótopo estável <sup>13</sup>C. Nos dois casos, as culturas foram feitas sob plantio direto. Além das parcelas com cultivo, utilizaram-se três locais sobre a mesma série de solos, com pastagens mistas de gramíneas e leguminosas com distinto tempo sem distúrbio, que foram chamadas de parcelas de referência. Não existiram diferenças no estoque de carbono até 0,9 m de profundidade entre os tratamentos de cultivo, embora, qualquer uma das parcelas de referência tenha apresentado maior estoque do que as parcelas sob cultivo. O δ<sup>13</sup>C da pastagem mostrou que esta é composta por uma mistura de plantas com metabolismo C3 e C4. Por isso, enquanto a monocultura fez uma marcação do material, mostrando o relevante aporte do milho no conteúdo de matéria orgânica nova, a rotação não influenciou de forma tão clara, já que sua composição não é muito diferente do que é a de a pastagem.

**Palavras chave:** sistemas de preparo, plantio direto, balanço de carbono, plantas C3 e C4



## RESUMEN

COSTANTINI, Alejandro Oscar. **Almacenamiento de carbono en un sistema agrícola de la Pampa argentina**. Seropédica: UFRRJ, 2003. 56p. (Tesis, Doctorado en Agronomía, Ciencia del Suelo)

Este trabajo ha sido realizado en parcelas experimentales establecidas en Marcos Juárez, centro de Argentina, correspondiente a la Región Pampeana. Los suelos son Argiudoles típicos (Chernossolos Argilúvicos), con alto contenido de limo como característica principal. En primer lugar, fueron estudiados, en una rotación maíz – trigo/soja – soja, los efectos de dos sistemas de labranza (labranza reducida y siembra directa) sobre los tenores de carbono orgánico total, carbono potencialmente mineralizable, C liberado por respiración a campo y almacenaje de carbono que presentaba la capa superficial del suelo, con vistas a hacer un balance de C. No hubo diferencias estadísticamente significativas para los contenidos porcentuales de carbono orgánico total. Si existieron diferencias en el C-CO<sub>2</sub> liberado a campo, pero esas diferencias no se reflejaron en el almacenamiento de carbono del suelo. El balance de carbono se presentó como ligeramente favorable para la siembra directa, mostrando una diferencia de C en la reserva del suelo o en C no liberado por respiración de 1,6 Mg ha<sup>-1</sup>. En otro ensayo en el mismo lugar, se estudió el efecto de la utilización de esa misma rotación comparado con el uso de monocultivo de maíz, para estudiar, ahora hasta 0,9 m de profundidad, el almacenaje de carbono y el origen de la materia orgánica del suelo, por medio de la técnica de marcación natural con el isótopo estable <sup>13</sup>C. En los dos casos los cultivos fueron hechos con siembra directa. Además de las parcelas con cultivos, se usaron tres lugares situados sobre la misma serie de suelos, con pasturas mixtas de gramíneas y leguminosas, con distinto tiempo sin disturbio, que fueron llamadas parcelas de referencia. No existieron diferencias en el almacenamiento de carbono hasta 0,9 m de profundidad entre los tratamientos de cultivo, no obstante, cualquiera de las parcelas de referencia presentó un almacenamiento mayor de carbono que las parcelas bajo cultivo. El  $\delta^{13}\text{C}$  de la pastura mostró que está compuesta por una mezcla de plantas con metabolismo C3 y C4. Por eso, mientras que el monocultivo de maíz realizó un marcado del material, mostrando el importante aporte del maíz a la materia orgánica nueva, la rotación no resultó tan clara, ya que su composición no es muy diferente a la de la pastura.

**Palabras clave:** sistemas de labranza, siembra directa, balance de carbono, plantas C3 y C4

## ABSTRACT

COSTANTINI, Alejandro Oscar. **Carbon stock in an agricultural system of Argentine Pampa**. Seropédica: UFRRJ, 2003. 56p. (Thesis, Philosophy Doctor in Agronomy, Soil Science)

This study was carried out in experimental plots established at Marcos Juárez, in the Pampean Region (center of Argentina) on Chernosol Argiluvic soils (Typic Argiudols), with high silt content. In the first place, the aim of this work was to study the effects of two tillage systems (minimum tillage and no-tillage) on the amount of total organic carbon, potentially mineralizable carbon, C released by respiration, and carbon stock in the topsoil in a corn - wheat / soybean -soybean rotation, with the further purpose of estimating the carbon balance. It was found out that there were no statistically significant differences for the percent content of the total organic carbon, and despite the differences found in the C-CO<sub>2</sub> released to the soil, such differences were not reflected in the soil carbon stock. The carbon balance was slightly favorable for the no-tillage system, showing a difference of 1.6 Mg ha<sup>-1</sup> C in the soil stock or in the C not released by respiration. The effect of the same rotation *versus* corn as a single crop in a no-tillage system was also studied through another trial at the same location to assess the carbon stock and the organic matter origin by the stable isotope <sup>13</sup>C technique, this time at 0,9 m depth. Apart from the experimental plots, three other locations were used as ‘control plots’. These controls had the same series of soils, mixed pastures of grass and leguminous, and different periods without disturbance. There were no differences in the carbon stock up to 0,9 m depth across the treatments. Nevertheless, all the controls presented a higher carbon stock than that of the plots under cultivation. The δ <sup>13</sup>C of the pasture showed that a mixture of plants with C3 and C4 metabolisms composed it. For this reason, while corn as a single crop evidenced a tracing of the material, thus showing the corn major contribution to new organic matter formation. This was not so clear in the rotation, since its composition did not differ much from that of the pasture.

**Key words:** tillage systems, no-tillage, carbon balance, C3 and C4 plants.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Pampa argentino abrange uma superfície superior a 10 milhões de hectares (HALL et al., 1992), com grande predomínio de solos correspondentes à ordem Chernossolos (Mollisols), desenvolvidos partindo de loess como material de origem, sob vegetação de gramíneas num clima temperado e úmido. Por estas características é uma das áreas mais produtivas da Argentina. A região é principalmente agrícola, e muitas vezes, do ponto de vista técnico, visando uma melhor conservação do solo, são recomendadas rotações com pastagens, que nem sempre podem ser cumpridas devido a uma relação de preços bem mais favorável para a agricultura em relação com a criação de gado.

A região norte do Pampa, foco do presente estudo, possui poucas limitações para seu uso, tendo sido tradicional a integração lavoura – pecuária em tempos variáveis, muitas vezes segundo condições próprias do solo, mas até com maior frequência, seguindo os problemas econômicos que afligem o produtor. Assim, nos anos 70 foi introduzida nesta região, tipicamente produtora de milho, a cultura de soja, com ajuda de um pacote tecnológico composto por agroquímicos e técnicas de plantio trazido de fora e com uma rentabilidade que atraiu o produtor.

Aquela região tornou-se, então, produtora de soja, diminuindo em grande proporção a quantidade de milho semeada. Porém os solos começaram manifestar alguns sintomas de degradação, principalmente nos níveis de matéria orgânica e na estabilidade dos agregados. Os encrostamentos foram cada vez mais frequentes, assim como as perdas por erosão. Embora com topografia predominantemente plana, existem pendentes nem sempre notáveis pelo grau de inclinação (o Pampa ‘Ondulado’ em geral não ultrapassa 2% de pendente) mas sim pelo comprimento, o que acarreta graves problemas de erosão hídrica.

Assim, mesmo que hoje a região continue sendo grande produtora de soja, os produtores incluíram novamente algumas outras culturas na rotação, tais como milho e trigo, com o objetivo de preservar os solos, e sempre se mantendo em níveis econômicos razoáveis. Por outro lado, devido à queda dos preços do gado em relação às atividades agrícolas, houve uma redução das áreas de pastagens. Embora sejam muitas as rotações agrícolas praticadas, a mais típica é aquela que inclui a seqüência milho – trigo/soja (dupla cultura) – soja.

Existem para a região, dados bem antigos sobre avaliações nos conteúdos de carbono orgânico ou de matéria orgânica. Embora tenham algum valor até histórico, nem sempre os dados têm confiabilidade suficiente para estudos de balanço de carbono, ou mesmo da evolução dos conteúdos de matéria orgânica no solo, seja porque não há certeza de como foram obtidos ou da padronização existente nos laboratórios de análise nos momentos em que foram realizados. Alguns desses dados, apesar dessa dificuldade serão apresentados na revisão de literatura. É possível entretanto inferir que os teores de carbono desses solos originalmente foram muito altos, e que o seu uso contínuo para agricultura foi causando uma queda desses conteúdos.

Para o presente trabalho, formulam-se as seguintes hipóteses:

1. Os sistemas de preparo do solo de maior potencial conservacionista influem de maneira positiva sobre o balanço de carbono nos solos, propiciando o seqüestro desse elemento.

2. Nas rotações de culturas, as espécies de metabolismo C3 ou C4 existentes, apresentam contribuição diferenciada na quantidade de carbono retida no sistema.

Para testar essas hipóteses, foram formulados os seguintes objetivos:

1. Determinar em uma das rotações de culturas mais comuns da região do Pampa as entradas e saídas de carbono do sistema.

2. Determinar a contribuição das diferentes espécies vegetais que compõem a rotação de cultivos, através da sua capacidade diferencial de fixar carbono para o estoque de C do solo, comparando-se com a verificada numa cultura de milho solteiro.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Balanço Global de C e a Matéria Orgânica do Solo

O ciclo do carbono é um dos principais ciclos biogeoquímicos. Possui um pronunciado efeito sobre as mudanças climáticas globais através das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre. O CO<sub>2</sub>, junto com outros gases de efeito estufa age sobre as propriedades físicas e químicas da atmosfera, e tem o potencial de alterar o balanço energético da terra.

O CO<sub>2</sub> é o mais abundante dos gases que propiciam o chamado efeito estufa, com uma concentração atmosférica aproximada de 345 ppm. Seu incremento anual está ao redor de 0,5%. Segundo os diferentes cenários, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera para o ano 2050 poderia atingir um nível de 440 a 660 ppm. (KUDEYAROV & KURGANOVA, 1998).

O solo tem um importante papel na produção de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa. A emissão anual líquida de CO<sub>2</sub> pelos solos tem sido globalmente estimada em 0,2-0,9 10<sup>15</sup> g C ano<sup>-1</sup>. Os ecossistemas onde as emissões de CO<sub>2</sub> excedem a assimilação na forma de produção primária são considerados como fontes de carbono. Aqueles onde o acúmulo predomina sobre a liberação, são considerados como sumidouros. A decomposição da liteira e a fotossíntese são os dois processos principais que controlam o balanço de carbono na natureza. As plantas obtêm nutrientes da mineralização da matéria orgânica e, nesse processo, carbono é perdido para a atmosfera. Os sistemas agrícolas sustentáveis dependem da compreensão e manejo destes dois processos (DE – POLLI, 1999).

O Painel Intergovernamental para a Mudança Climática (IPCC) menciona três opções principais para mitigar a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico para o setor agropecuário (MARTINO, 2000) a saber: 1) redução das emissões que tenham relação com a agricultura; 2) criação e estabelecimento definitivo de um sumidouro de carbono no solo, e 3) produção de biocombustíveis para substituir os combustíveis fósseis.

Os efeitos diretos das elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> sobre o ciclo do carbono no solo são pouco prováveis, tendo em conta as altas concentrações ambientais de C no solo. Existem evidências de que o crescimento das plantas e o seqüestro de C pelo solo estão aumentando devido ao chamado efeito de adubação fisiológica com CO<sub>2</sub>, que está associado com um crescente nível deste gás na atmosfera (ALLEN et al., 1996 citado por BATJES, 1998), uma melhoria na eficiência do uso da água, temperaturas mais favoráveis e uma crescente emissão antropogênica de gases de N (MELILLO, 1996 citado por BATJES, 1998). Nesse contexto, a possibilidade de realçar e sustentar o seqüestro de carbono no solo deveria ser considerada como uma forma possível de mitigar os incrementos nas concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico (BATJES, 1998).

Para determinar o balanço global de carbono com maior precisão, é importante determinar o ciclo do C para diferentes tipos de solo, regiões geográficas e zonas climáticas (KUDEYAROV & KURGANOVA, 1998). Achar um compartimento que armazene carbono na biosfera mantendo-se um fornecimento adequado de nutrientes para o crescimento das plantas é um desafio importante da agricultura moderna. A biomassa microbiana pode ter um papel de fonte, sumidouro e catalisador para a liberação de nutrientes. É um componente principal do subsistema de decomposição que regula a produtividade do ecossistema (WARDLE, 1998).

A matéria orgânica é um componente associado com a produtividade dos agroecossistemas (BAUER & BLACK, 1994). O cultivo das terras causa normalmente um decréscimo no conteúdo de carbono orgânico do solo, muitas vezes devido a uma diminuição na entrada de matéria orgânica, e à aceleração na decomposição daquela que já existe, pelas lavouras (GUPTA & GERMIDA, 1988; HAVLIN et al., 1990; RICHTER et al., 1990) através de um acréscimo no arejamento do solo (DAVIDSON & AKERMAN, 1993 citado em BUYANOVSKY & WAGNER, 1998). O preparo do solo, o tipo de rotação e o manejo dos resíduos de cultivo têm sido identificados como fatores que exercem controle sobre o nível de matéria orgânica dos solos (PARTON et al., 1987).

É amplamente aceito que a conversão de terras virgens, seja de pastagens ou florestas, para um sistema cultivado causa diminuição nos níveis de matéria orgânica do solo. Geralmente, entre 20 e 40% da matéria orgânica do solo é perdida quando estas terras são colocadas em agricultura (DAVIDSON & AKERMAN, 1993 citado em BUYANOVSKY & WAGNER, 1998).

BUYANOVSKY & WAGNER (1998) mostraram como todos os sistemas de produção usados num experimento apresentaram uma perda de C, em relação àquela que se apresentava 100 anos atrás em solos virgens. As perdas maiores foram observadas em parcelas sob monocultura e sem aplicação de fertilizante. Os solos sob trigo e milho perderam, ambos, quase a metade do seu conteúdo inicial de C orgânico.

Existe uma grande variação na quantidade e distribuição vertical da matéria orgânica em solos boreais, temperados, tropicais e subtropicais. A matéria orgânica do solo, armazenada na camada superficial, contribui ativamente na ciclagem de nutrientes no sistema solo – água – planta e nas trocas gasosas com a atmosfera, embora, aquela que está no subsolo também possa ser importante (BATJES, 1998) para o fornecimento de nutrientes e a manutenção de propriedades físicas do solo tais como a estabilização dos agregados (CONTI, 2000)

A liberação de CO<sub>2</sub> sob condições de campo representa a respiração combinada das raízes das plantas e da biota do solo, e é um indicador sensível da decomposição de resíduos de cultivo, transformação de carbono orgânico do solo e distúrbios no ecossistema. Outras reações que produzem CO<sub>2</sub> tais como a respiração anaeróbia, a formação de metano e as reações do ácido carbônico afetam muito pouco as relações entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e a respiração (PAUL et al., 1999).

## **2.2. Práticas Agrícolas e Balanço de C**

O manejo do solo numa agricultura sustentável envolve diferentes sistemas de preparo e rotações de culturas, com diferentes entradas em quantidade e qualidade de resíduos. Estes sistemas envolvem, comumente, compartimentos significativos de carbono orgânico do solo. Estes incluem tanto as fontes de C de liberação rápida como as lentas, cujos tamanhos e taxas de transformação são utilizados para descrever a dinâmica da matéria orgânica. Os tamanhos e as transformações tem oferecido, no passado, dificuldades para serem medidos. Atualmente, as frações ativa e lenta podem ser determinadas com maior precisão mediante o CO<sub>2</sub> liberado durante a decomposição do carbono orgânico do solo sob condições de laboratório (NICOLARDOT et al., 1994).

O plantio direto tem sido proposto como uma alternativa aos sistemas de preparo convencionais, em função da redução na degradação dos solos, devido a que, em geral, conduz a um acréscimo no conteúdo de carbono da camada superficial, se comparado com os solos trabalhados de maneira convencional (KERN & JOHNSON, 1993). No entanto, dependendo da camada investigada, o conteúdo de carbono orgânico sob

plantio direto pode ser mais alto (KERN & JOHNSON, 1993) ou mais baixo (KARLEN et al., 1991) do que nos solos onde o preparo convencional é feito.

Quando as entradas de carbono no solo não são afetadas pelos sistemas de preparo, dois são os mecanismos propostos pelos quais se produzem estas diferenças. Em primeiro lugar, tem sido sugerido que mudanças na composição da comunidade microbiana, com um acréscimo na razão biomassa fungos / biomassa bacteriana, sob plantio direto, implicaria em maior retenção de carbono, devido à maior eficiência dos fungos em relação às bactérias (HOLLEMAN & COLEMAN, 1987). Por outro lado, também tem sido proposto que a matéria orgânica particulada nos macroagregados do solo maiores de 250  $\mu\text{m}$  esteja fisicamente protegida dos distúrbios nos sistemas de plantio direto (BEARE et al., 1994). ALVAREZ et al. (1998) estimaram um balanço negativo de C em solos da região do Pampa argentino, com uma perda líquida deste elemento, embora tenham admitido que poderia haver uma superestimação das emissões de  $\text{CO}_2$  medidas. Resultados prévios encontrados por ALVAREZ et al. (1995) trabalhando nos mesmos solos com rotação trigo – soja, apontavam no mesmo sentido, informando sobre uma diminuição da matéria orgânica nos solos, se o sistema de preparo era mantido. Por outro lado, ALVAREZ (1999), integrando resultados de distintos experimentos realizados no Pampa Úmido diz que é possível estimar um aumento médio de 4-5  $\text{Mg C ha}^{-1}$  ao passar de preparo com arado de aiveca para sistemas de preparo conservacionistas, principalmente, plantio direto, num período de 10 anos. Este acréscimo se produz em torno dos 10 anos, quando se atinge um equilíbrio entre o conteúdo de carbono dos solos sob plantio direto em relação aos preparados de outras formas. CARTER (1991) observou que o plantio direto e os sistemas que movimentam o solo somente na superfície incrementam significativamente os níveis de carbono microbiano nessa camada superficial, se comparados com o sistema tradicional usando arado de aiveca. Também foi evidente uma tendência de maior concentração de carbono orgânico do solo em plantio direto. Comparados com os solos sob cultura, aqueles sob pastagem tiveram níveis de biomassa-C bem maiores, provavelmente devido aos maiores teores de carbono orgânico no solo.

Experiências realizadas em Pergamino, região norte do Pampa argentino, mostraram um acúmulo de resíduos vegetais de maior diâmetro principalmente em sistemas de plantio direto nos primeiros 5 cm. No resto da profundidade analisada (até 20 cm) não foram encontradas diferenças entre os diferentes sistemas (ALVAREZ et al., 1995b).

GHELFI et al. (1984) num trabalho cujo objetivo foi a medição de N fixado pela soja, apresentaram dados de matéria orgânica para um solo do norte da Região do Pampa de 3,03% para a camada superficial (0-20 cm); 2,4% para a camada entre 20 e 35 cm; 1,4 para os 15 cm seguintes e pouco menos de 1% por baixo dos 50 cm de profundidade. Os conteúdos são realmente altos, principalmente nos estratos inferiores. Este solo nunca tinha sido cultivado com soja nem com outra leguminosa anteriormente e vinha sendo preparado de maneira convencional. Teores de carbono orgânico de 2,3 % são citados para solos do Partido de Salto, onde ficam muitos dos melhores solos da região, mesmo que tenham recebido preparos de solo muito intensos, com várias passadas de arado de aiveca e grades (ZOURARAKIS, 1983).

Uma situação especial dentro dos solos do Pampa é aquela do sudeste da região. Esses solos, classificados também como Argiudols típicos contém uma quantidade bem maior de matéria orgânica que os de outras zonas do Pampa. RIZZALLI et al. (1984) acharam conteúdos de matéria orgânica nesses solos de 6,5 e 6,02 % em pastagens e em solos trabalhados e em pousio, respectivamente. Eles determinaram as quantidades de biomassa-C que apresentavam os solos, e acharam que a fração de carbono orgânico

contido na biomassa foi 1,12% e 0,79% para pastagem e pousio, respectivamente. As determinações de evolução de CO<sub>2</sub> feitas neste trabalho foram sob condições de laboratório e em períodos muito curtos, o que não permite fazer estimações de balanço de carbono.

É preciso diferenciar que a maior capacidade de mineralização não supõe necessariamente uma tendência a diminuir o estoque de carbono do solo. Os solos têm a capacidade potencial de mineralizar mais porque têm mais carbono (ou matéria orgânica em geral) lábil. A adição de materiais carbonados ao solo produz o incremento do seu ritmo respiratório devido ao acréscimo da massa celular dos organismos heterótrofos que usam esses materiais como fonte de carbono e energia (VORONEY & PAUL, 1984). ALVAREZ & SANTANATOGLIA (1988) disseram que quando o aporte de carbono facilmente mineralizável aumenta, a eficiência da flora microbiana para usar o substrato diminui, o que supõe um menor efeito residual do carbono agregado.

Vários trabalhos foram desenvolvidos na Argentina com o objetivo de comparar plantio direto com outros sistemas de preparo de solos. Em geral, a tendência mostrou que o plantio direto aumentava o conteúdo de carbono e nitrogênio dos solos (PIDELLO et al., 1995). Além deste incremento, também se aumentava o número de microorganismos do solo e a capacidade potencial de mineralização de nitrogênio (SAUBIDET & GIAMBIAGI, 1991).

DIAZ ZORITA (1999), trabalhou num Hapludol típico do noroeste da Província de Buenos Aires, na procura de sistemas de preparo do solo para um manejo sustentável durante ciclos agrícolas de milho e soja, partindo de uma pastagem de *Festuca* sp. O autor verificou que a concentração de carbono orgânico total variou entre 1,45 e 2,60 g kg<sup>-1</sup>, detectando-se uma interação significativa entre sistemas de preparo de solo e profundidade da camada avaliada. Para cada profundidade, os níveis observados para preparo convencional (com arado de aiveca) foram inferiores aos que se apresentaram em plantio direto ou na situação inicial. A informação disponível não conseguiu detectar diferenças para o carbono entre os sistemas de preparo mais conservacionistas e a situação inicial.

CRESPO et al. (2001), acharam conteúdos de carbono orgânico significativamente maiores em solos sob plantio direto (36,6 Mg ha<sup>-1</sup>) do que naqueles com preparo convencional (32,1 Mg ha<sup>-1</sup>). Depois de 5 anos houve um ganho de carbono no solo sob plantio direto de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> nos 7,5 cm superficiais. Os níveis de C foram aumentando a uma taxa média de 90 g C m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>. Segundo estes autores, o maior acúmulo de matéria orgânica não é devido a efeitos diferenciais do preparo do solo no rendimento das culturas, já que a biomassa aérea estimada e a quantidade de C da palhada que voltou para o solo foi similar em ambos sistemas de preparo do solo. Possivelmente, uma menor intensidade na mineralização da matéria orgânica devido a temperaturas mais baixas, junto com a não incorporação dos resíduos no solo sejam as razões do maior conteúdo de C orgânico sob plantio direto. Também COSENTINO et al. (1998) acharam uma diminuição dos conteúdos de carbono orgânico em preparo convencional e preparo reduzido quando comparado ao plantio direto, em Argiudols de Marcos Juárez, no centro da Argentina. Tais diminuições foram de 32% e 27%, respectivamente. Os decréscimos foram ainda maiores nos conteúdos de biomassa-C, fração mais lábil e portanto mais facilmente mineralizável.

ALVAREZ et al. (1995 a), também em solo de Pergamino sob rotação trigo – soja, mostraram que as perdas estimadas de CO<sub>2</sub> excederam os aportes de C, indicando um decréscimo contínuo no conteúdo de matéria orgânica se a rotação se mantém. A diferença na qualidade do substrato é um fator principal na regulação da velocidade de mineralização (CONTI et al. 1997). Partindo de quatro rotações ANDRIULO et al.



(1999 b) concluíram que os coeficientes de humificação (e portanto também os de mineralização) dependem da natureza dos resíduos de colheita e variam segundo a proporção de lignina. Observou-se que o aumento na intensidade do preparo do solo causado pela dupla cultura trigo-soja num ano só ocasiona uma grande mineralização de carbono.

COSTANTINI et al. (1995) mencionaram que a implementação do sistema de plantio direto substituindo ao preparo convencional pode representar uma poupança de carbono para o solo. O ganho de carbono com essa mudança no preparo está por volta dos 311 g C ha<sup>-1</sup> hora<sup>-1</sup>. Mesmo que sejam estimações que provêm de determinações no laboratório, elas podem revelar a importância do manejo do solo (neste caso o preparo) sobre a economia do C no solo e a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Trabalhos feitos em Uruguai mostram que num período de 10 anos, cultivando o solo com plantio direto, e partindo de um solo com 3% de matéria orgânica nos 20 cm superficiais, o seu conteúdo subiu para 4% em 10 anos, o que implica um acúmulo de aproximadamente 1,0 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (MARTINO, 2000).

Quando comparados com uma pastagem, os sistemas cultivados tiveram uma redução de 40-50% da matéria orgânica e da sua forma potencialmente ativa, a biomassa microbiana, nos 6 cm superficiais. Ainda não existiram efeitos notáveis quando os primeiros 24 cm foram tomados em conta (ANGERS et al., 1992). COSTANTINI et al. (1995, 1996) trabalhando em regiões do Pampa com características bem diferentes entre elas, mostraram maior concentração de carbono orgânico total em solos sob plantio direto do que sob outros sistemas de preparo, apesar desses teores terem sido sempre menores quando comparados com os solos testemunha (pastagens). Os conteúdos de biomassa-C acentuavam essa tendência.

O preparo do solo pode induzir um pulso de emissão de C-CO<sub>2</sub> com uma duração de 20 a 25 dias (ALVAREZ et al., 1998). Este pulso pode ser atribuído à incorporação de resíduos de plantas ou à quebra dos agregados do solo. Desde que um solo não coberto tem geralmente maior temperatura do que um que está coberto com palha, um aumento na temperatura do solo é também uma causa possível desse pulso, se a umidade não for limitante.

Outro aspecto a se tomar em conta no estudo da evolução da matéria orgânica diante de alternativas de manejo é o das suas diferentes frações. A fração de baixa densidade da matéria orgânica é composta, principalmente, de resíduos de plantas e materiais parcialmente decompostos (GOLCHIN et al., 1995). Esta fração está mais influenciada pelas práticas culturais do que o total de matéria orgânica do solo (BREMER et al., 1994). Sua transformação é mais rápida do que aquela de compostos humificados, sendo então um componente ativo do compartimento de carbono orgânico (MAGID et al, 1996). O carbono da fração leve está relacionado com o carbono da biomassa microbiana e a respiração (BREMER et al., 1994).

É ainda incerto em qual direção se movimentam atualmente os compartimentos de C. Sob elevados níveis de CO<sub>2</sub>, a maioria das plantas produzem tecidos que contém mais C e menos N. O suposto é então que este incremento na relação C/N, induzido pela concentração de CO<sub>2</sub> e possivelmente pelo incremento no conteúdo de lignina, levará a reduzir as taxas de decomposição, e portanto, aumentar o seqüestro de carbono no solo. Todavia KÖRNER (1996, citado em BATJES, 1998) mostrou que há um outro caminho por onde a fertilização com CO<sub>2</sub> pode influenciar o ambiente do solo. É através do incremento nas crescentes taxas de ciclagem de raízes finas e exsudatos de compostos da rizosfera de baixo peso molecular. Quantitativamente, os exsudatos radiculares podem ser bem menos importantes em florestas do que em pastagens.

A mineralogia do solo é um outro fator que exerce um forte controle sobre os compartimentos de carbono passivos, através da formação de complexos húmico-argilosos. Conforme TORN et al. (1997), o efeito da mineralogia sobre o armazenamento de carbono no solo é tão importante como aquele que se atribui ao clima ou à vegetação.

As mudanças no uso da terra em florestas, pastagens e regiões alagáveis têm transformado grandes áreas de ecossistemas relativamente estáveis em sistemas com manejos agrícolas extensivos ou intensivos. A introdução da agricultura, com todos os impactos sobre o ambiente que ela traz, tem tido uma influência importante sobre os compartimentos de C e os fluxos dele ao redor da Terra. Na fase inicial destas transformações, as principais perdas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera ocorrem devido às mudanças nos níveis de C do solo, que se ajustam as entradas reduzidas de C e a um crescente efeito de distúrbio no solo (LAL et al., 1998).

LAL et al. (1998), atribuem uma grande importância ao preparo conservacionista e ao manejo dos resíduos (o que implica também na qualidade dos resíduos por meio da escolha das rotações) no potencial de seqüestro de carbono de um solo.

BALESDENT et al. (1987) mencionam que muitos estudos sobre dinâmica do carbono orgânico no solo baseiam-se em comparações de parcelas que recebem diferentes níveis de adubos orgânicos, ou incorporação de material vegetal com carbono marcado. A abundância natural do isótopo estável <sup>13</sup>C pode ser em alguns casos um bom traçador natural de entradas de material orgânico ao solo.

A razão isotópica é expressa como  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}\text{‰} = [(R_{\text{amostra}}/R_{\text{standard}})-1]$ ), onde R é a relação isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C das plantas superiores e seus caminhos metabólicos, tem sido enfatizada por BENDER (1968). O efeito do isótopo induzido pela reação enzimática na carboxilação primária é muito maior para plantas C3 do que para as C4. Portanto, partindo do CO<sub>2</sub> atmosférico, cuja composição isotópica é cerca de -7‰, as plantas C3 apresentam valores de  $\delta^{13}\text{C}$  que vão de -23 a -40‰ com um valor mais freqüente em torno de -27‰ enquanto que as plantas C4 apresentam valores de  $\delta^{13}\text{C}$  que vão de -9 a -19‰, com um valor mais freqüente de -12‰. Quando comparadas plantas que apresentam estes dois caminhos fotossintéticos, e crescem no mesmo ambiente, existe uma diferença média de 12 a 14‰ em  $\delta^{13}\text{C}$  (SMITH & EPSTEIN, 1971). Quase todas as espécies de regiões temperadas e todas as árvores pertencem ao grupo C3. Já a maioria das plantas tropicais das famílias Quenopodiáceas e Gramíneas (ex., *Zea*; *Sorghum*; *Saccharum*) pertencem ao grupo das C4.

Quando plantas C4 crescem num solo que anteriormente estava sob cobertura de vegetação de plantas C3, isto pode-se considerar como um marcado *in situ* da matéria orgânica que é incorporada no solo. Devido à relativa debilidade deste marcador no sinal, este se aplica melhor nos casos de várias culturas sucessivas (BALESDENT et al., 1987)

Utilizando a técnica da abundância natural de <sup>13</sup>C para examinar as transformações da matéria orgânica do solo, BALESDENT et al. (1987) demonstraram a existência de um grande compartimento de matéria orgânica muito estável num Alfisol sob vegetação de pastagem. Depois de aproximadamente 100 anos de cultivo, a proporção de matéria orgânica remanescente da pastagem de origem estava em torno de 50 %. BALESDENT et al. (1987) sustentam que esta técnica é aplicável quando existem mudanças no tipo de vegetação (de plantas C3 para C4 ou vice versa)

Pode-se dizer que as práticas de manejo deveriam otimizar a utilização do CO<sub>2</sub> na fotossíntese para aumentar a produtividade das culturas e os rendimentos, e para incrementar especialmente a fração passiva ou estabilizada da matéria orgânica do solo.

As opções disponíveis incluem: alta produção de resíduos, cobertura vegetal, redução dos pousios nus, práticas de preparo que limitem a profundidade e a intensidade do distúrbio mecânico do solo, e práticas de adubação (BATJES, 1998)

O grau em que as várias técnicas de manejo serão efetivas depende de vários controles ambientais, alguns dos quais podem ser alterados com a mudança climática. As implicações no manejo que traz a elevação na concentração de CO<sub>2</sub> e as crescentes temperaturas devem ser consideradas. O incremento no CO<sub>2</sub> atmosférico pode estimular o crescimento da cultura até que o fornecimento de nutrientes ou de água se torne limitante.

O potencial de seqüestro de C nos solos não é ilimitado para um ecossistema em particular. Após parar com a produção agrícola, o seqüestro de C poderia continuar só até atingir um novo equilíbrio no conteúdo de C do solo, que poderia ser alcançado dentro de um período de 50 a 100 anos (MOSIER, 1998).

Em zonas temperadas, áreas consideráveis de terras, anteriormente cultivadas, tem sido retiradas do cultivo por programas governamentais. Nestas áreas está acontecendo um significativo seqüestro de C que vai continuar até atingir um novo estado de equilíbrio (MOSIER, 1998). Os solos tendem naturalmente para um estado de equilíbrio se os fatores ambientais e as práticas agrícolas permanecem constantes. Por exemplo, logo após uma mudança no manejo, o equilíbrio é perturbado e o sistema move-se lentamente até um novo equilíbrio caracterizado pelas novas condições do ambiente geradas pelo manejo (ANDERSON & DOMSCH, 1989).

O tempo, os fertilizantes e os sistemas de preparo podem alterar os níveis de carbono orgânico do solo. O efeito de tratamentos de cultivo de longo prazo, em conjunto com a fertilização, foi estudado por ROBINSON et al. (1996). Os autores analisaram 5 rotações de culturas e dois níveis de adubação em três áreas em Iowa, Estados Unidos, que foram mantidas nas mesmas condições de cultivo por 12 a 36 anos. Estudaram também uma área que foi mantida por 75 anos sob monocultura de milho. Os solos eram Hapludols e Haplaquols. As rotações compostas por milho, aveia e alfafa, ou mistura de alfafa com trevo vermelho tiveram os conteúdos maiores de carbono orgânico do solo, sempre que foram fertilizados. A monocultura de milho apresentou uma queda do carbono orgânico de 35% com respeito à situação inicial.

RICE (2001) diz que a quantidade de C que pode se seqüestrar no solo depende de vários fatores. Alguns deles são próprios das variações do clima e o conteúdo de argila. Muitos lugares da região central dos Estados Unidos e Canadá que eram ocupados por pastagens, atualmente têm sido trabalhados com agricultura. As pastagens têm a capacidade de armazenar a maior parte do C sob a terra, que pode, eventualmente, se converter em C do solo. Muitas práticas já feitas em culturas têm diminuído o C do solo, mas os avanços nas técnicas de produção de culturas e nas práticas de manejo têm aumentado o potencial da agricultura para elevar o C do solo. Ganhos adicionais de C nos solos agrícolas poderiam se atingir com uma redução no preparo e um melhor manejo da palhada.

A maior contribuição dos sistemas de plantio direto para atenuar as mudanças climáticas seria a diminuição da mineralização da matéria orgânica do solo, e em menor medida, na supressão da erosão dos solos. Estes dois fatores combinados poderiam gerar num prazo de dez anos, para as condições do Uruguai, sumidouros de até 15 Mg C ha<sup>-1</sup>. Assumindo que na região tem-se adotado o sistema de plantio direto em mais de 5 milhões de hectares desde 1990 (ano base do Protocolo de Quioto), pode-se esperar que para o ano 2010 o seqüestro de carbono tenha superado os 50 milhões de toneladas. Esta importância per si representa 1% do total de reduções de emissões acordadas pelos países desenvolvidos (MARTINO, 2001)

BAETHGEN & MARTINO (2000), mostram as oportunidades que pode ter o Uruguai no mercado de carbono. O trabalho é relevante por ser o Uruguai um membro do Mercosul, e pelas semelhanças com parte da região produtiva da Argentina e o sul do Brasil, principalmente o Rio Grande do Sul. Na verdade muitos estudos em ecologia agrupam esta parte dos territórios dos três países como a região do Pampa.

O aumento no teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera terá como consequência, importantes mudanças no planeta. Algumas dessas mudanças são alterações nas atuais regiões de vegetação, mudanças na quantidade e distribuição das precipitações, derretimento de geleiras, aumentos do nível do mar, inundações de zonas à beira mar, etc. (BAETHGEN & MARTINO, 2000). Estudos conduzidos no Uruguai mostram que a produtividade das culturas de inverno seria reduzida 20-30% sob os cenários de mudança climática projetados por modelos de circulação geral. Trabalhos mais recentes sugerem também uma diminuição dos rendimentos dos cultivos de verão, os quais também veriam-se afetados negativamente por um aumento das temperaturas (BAETHGEN & MARTINO, 2000).

Um passo importante para começar a agir no momento que seja preciso no mercado de carbono é fazer um inventário dos gases de efeito estufa (GEE) para cada um dos países. Muitos já tem começado esse trabalho segundo metodologias aprovadas pelo IPCC. BAETHGEN & MARTINO (2000) apresentam no seu trabalho alguns dos resultados do inventário uruguaio de emissões de GEE, enfatizando aqueles que provêm dos setores agropecuário e florestal. Eles dizem que o Uruguai tem o potencial para gerar certificados de carbono por centenas de milhões de dólares anuais através de vários mecanismos, dos quais os mais importantes são a implantação de bosques, as mudanças no uso da terra e a redução das emissões de metano e óxido nitroso pelos ruminantes.

No Uruguai, o plantio de bosques com espécies de rápido crescimento é a oportunidade mais imediata e quantitativamente mais importante. A capacidade de seqüestro de carbono é por volta de 5 – 7 t C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na madeira e de 1-2 t C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no solo. Na área atualmente coberta por florestas, a captura de carbono do ar é de cerca de 3 milhões de toneladas anuais, o que poderia-se multiplicar por 3 ou 4 vezes se conseguir o aproveitamento das áreas que tem sido declaradas de prioridade florestal e ainda não tem sido plantadas. Assumindo um preço de mercado de US\$ 25 a tonelada de carbono, o Uruguai poderia estar gerando divisas por mais de 200 milhões de dólares pela venda de certificados, isso além dos ganhos pela comercialização da madeira. Deve-se tomar em conta que a essa cifra deveria-se descontar a quantidade de carbono que será retornada à atmosfera pela decomposição dos produtos obtidos, o que ainda não é claro de que maneira poderia-se contabilizar (BAETHGEN & MARTINO, 2000).

Quanto às mudanças no uso da terra, BAETHGEN & MARTINO (2000) estimam que a incorporação do plantio direto em substituição de outras formas de preparo de solo poderia gerar um acúmulo de C de 2 Mg por hectare e por ano, tendo em consideração a redução de emissões e a formação de matéria orgânica estável nos solos. O Uruguai tem aproximadamente 1 milhão de hectares cultiváveis o que permitiria ao país arrecadar uns 50 milhões de dólares por ano, além de melhorar muito a qualidade dos solos.

Uma fonte muito importante de emissões de GEE no Uruguai é a criação de gado, devido ao grande estoque, principalmente bovino que possui o país. Os criadores uruguaio emitem 1 kg de metano por kg de carne produzida e 40 gramas desse gás por litro de leite que é obtido. Se forem transformadas em unidades de aquecimento global teríamos um equivalente de 5,7 e 0,2 toneladas de Carbono por kg de carne e litro de leite, respectivamente. Se os produtores tivessem que pagar pela poluição que

ocasionam, assumindo um preço de 25 dólares a tonelada, seu ganho veria-se diminuído em 140 dólares por cada tonelada de carne produzida e US\$ 0,006 por litro de leite. Se além do metano fossem consideradas as emissões de óxido nitroso, estes custos facilmente acabariam dobrando (BAETHGEN & MARTINO, 2000).

Mesmo que as emissões de metano por unidade de produto tenham diminuído muito na última década, os valores são ainda muito altos, principalmente na criação extensiva. Isto constitui uma ameaça para um setor muito importante da atividade econômica do Uruguai, já que alguns mercados poderiam criar barreiras às exportações uruguaias de carne e lã baseando-se no alto custo ambiental destes produtos. A redução de emissões poderia também evitar o surgimento de barreiras, além de gerar um ingresso adicional de dinheiro.

A venda do serviço de seqüestro de carbono poderia gerar ingressos adicionais de importância aos agricultores. As incertezas sobre o desenvolvimento do mercado ainda não permitem fazer previsões com alguma exatidão sobre o preço dos certificados de carbono. Se assumirmos um preço entre 5 e 15 dólares por tonelada o valor de mercado do sumidouro de carbono na região estaria em valores entre 250 milhões e 750 milhões de dólares (MARTINO, 2001).

Tais cifras podem ser afetadas pelo balanço de emissão e absorção de outros gases de efeito estufa, além do CO<sub>2</sub>. Por exemplo, a inclusão de leguminosas nas pastagens poderia potencializar o processo de seqüestro de carbono, ao fornecer o nitrogênio necessário (SISTI, 2001), embora também pode ter como consequência uma não desejada emissão de óxido nitroso. Uma coisa similar pode acontecer com a adoção do plantio direto que traz com ela um incremento no uso de adubos nitrogenados. Existem autores citados por MARTINO (2001) que estimaram o potencial de aquecimento global líquido de diferentes ecossistemas. Este indicador abrange a emissão e absorção de todos os GEE, e seria mais adequado que a simples mudança no conteúdo de carbono dos solos para estimar a produção de certificados de carbono.

O cone Sul da América, devido a suas características geográficas, climáticas, econômicas e culturais tem o potencial para ser um dos maiores sumidouros de carbono. Em primeiro lugar, seus solos já tem perdido consideráveis quantidades de carbono devido ao uso anterior, o que implica que existe um potencial ecológico para armazenar novamente uma quantidade importante de C. Em segundo lugar, é uma região com uma densidade de população relativamente baixa e unidades de produção relativamente grandes, o que tem como resultado uma baixa pressão dos sistemas agrícolas sobre os recursos naturais. Finalmente, é a região do mundo onde o plantio direto tem tido a maior taxa de adoção, ou seja que já existe um caminho andado (MARTINO, 2001).

O desenvolvimento do mercado de carbono com participação de agricultores poderia fornecer o estímulo econômico para terminar de consolidar o caminho para uma agricultura mais sustentável (MARTINO, 2001).

### **2.3 Caracterização da Região do Pampa Argentino**

A temperatura e a umidade permitem definir na região do Pampa argentino três regimes: Údico, Ústico e Arídico. O material original dos solos da região é o loess pampiano, do Quaternário, que vai diminuindo seu tamanho de partícula desde o oeste ao leste, na mesma direção em que aconteceu seu depósito na região. No oeste do Pampa apresenta tamanho até de areia fina. A paisagem assim apresenta ondulações produzidas por dunas. Os solos apresentam horizontes A com estrutura fraca e são susceptíveis à erosão. O desenvolvimento do perfil de solo é incipiente, com horizontes superficiais pouco espessos.

O Pampa Arenoso (Figura 1) ocupa parte das Províncias de Buenos Aires, Córdoba e La Pampa. A drenagem não está muito bem definida, apresentando-se grandes áreas com lagos e muitas áreas com processos de salinização. O escoamento se produz entre as dunas porém é insuficiente para a eliminação dos excessos d'água. Este problema está sendo muito importante em anos com precipitações acima das normais. Os solos das zonas mais altas são profundos, com pH neutro, estabilidade estrutural fraca e susceptíveis à erosão eólica. São em geral Hapludols, típicos ou énticos (estes últimos nas posições mais altas. Nos lugares mais planos se apresentam Hapludols tapto árgicos, ou seja, solos com diferentes materiais originais no seu perfil. Nos locais mais baixos os Hapludols tapto árgicos gradam para tapto nátricos e finalmente nas depressões aparecem Natraquols e Natraqualfs (COSENTINO et al., 2000).

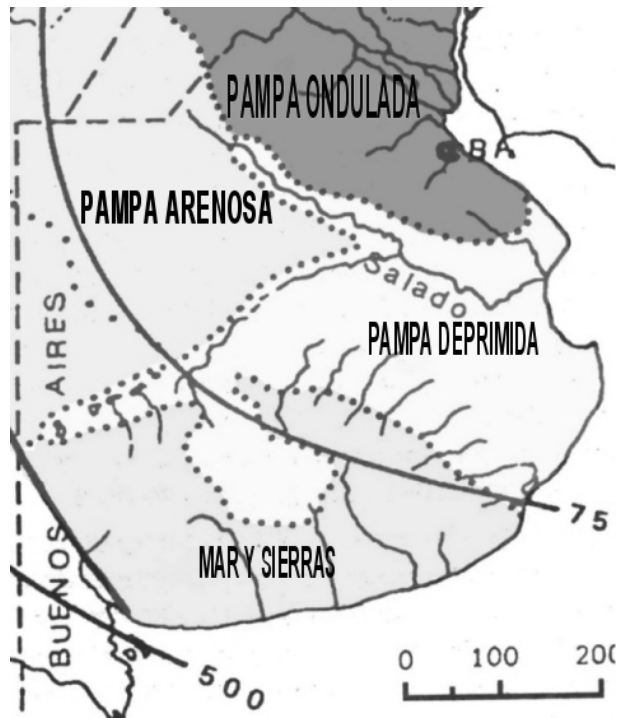
A região do Pampa deprimido (Figura 1) apresenta sedimentos argilosos trazidos pelo mar e depositados no local. Em muitos lugares aparecem problemas de baixa permeabilidade, altos conteúdos de sódio trocável e salinidade. Natraquol e Natraqualf são solos comuns na região, mesmo que também se apresentam solos de maior aptidão para a produção. No Pampa deprimido a influência do relevo se dá em escala pequena. Uns poucos centímetros de diferença de um local para outro implicam a presença de solos com propriedades muito contrastantes. A característica principal do Pampa deprimido é sua pequena pendente e a dificuldade para escoamento das águas superficiais (COSENTINO et al., 2000).

O Pampa Ondulado (Figura 1) abrange parte das Províncias de Buenos Aires, Santa Fé e Córdoba. Apresenta uma drenagem bem definida, com pendentes em torno de 1,5 – 2%, embora às vezes sejam um pouco maiores. O comprimento delas gera uma alta susceptibilidade à erosão hídrica, sendo uma limitação para o uso desses solos. Mesmo assim os solos são na sua maioria agricultáveis nos lugares mais altos, misturados com aqueles de locais mais baixos que nem sempre possuem aptidão agrícola. Os solos dos locais mais altos são muitas vezes Argiudols típicos, profundos e bem drenados. Para leste da região existe uma tendência a apresentar maior conteúdo de argila, ocorrendo então os Argiudols vérticos. Os solos são bem desenvolvidos e, normalmente, o horizonte C aparece além de 1,5 m de profundidade (COSENTINO et al., 2000).

O Pampa pode-se dividir em diferentes regiões naturais, apresentadas na Tabela 1 e algumas das quais podem-se localizar na Figura 1. O relevo da região do Pampa em geral é plano. Se destacam, mesmo que não sejam muito altos, os sistemas serranos de Tandilia e Ventania, com seus solos nos arredores bem drenados, embora susceptíveis à erosão hídrica (COSENTINO et al., 2000).

**Tabela 1:** Resumo das regiões naturais do Pampa argentino

| <b>Grande Unidade Geomorfológica</b> | <b>Região Natural</b>   | <b>Relevo</b>   |
|--------------------------------------|---|---|
| Serras                               | Sistema de Tandilia<br>Sistema de Ventania  | Escarpado a Ondulado  |
| Lhanuras Continentais                | Pampa Ondulado<br>Pampa Interserrano<br>Pampa Deprimido<br>Pampa Arenoso<br>Delta | Ondulado<br>Suavemente Ondulado<br>Plano a Plano - côncavo<br>Ondulado<br>Plano |



**Figura 1:** Localização de algumas regiões naturais do Pampa Argentino

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido a partir do ano 2000 nas parcelas experimentais instaladas na Estação Experimental Agropecuária do INTA ('Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria'), localizada na periferia da Cidade de Marcos Juárez, Córdoba, República Argentina ( $32^{\circ} 42' S$ ,  $62^{\circ} 07' O$ ), altitude 107 m sobre nível do mar. O local apresenta um clima temperado e sub-úmido, com uma temperatura média anual de  $17^{\circ}C$  e uma precipitação média de 924 mm, com alguma tendência a ser maior entre os meses de outubro e março. Na Figura 2 apresenta-se a localização geográfica de Marcos Juárez, e, nas Figuras 3 e 4 as temperaturas médias mensais e precipitações dos períodos em que aconteceram as amostragens dos experimentos, entre os anos 2000 e 2002.



**Figura 2:** Localização geográfica de Marcos Juárez, local do trabalho

Os solos são CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS (Mollisols, Typic Argiudols), Série Marcos Juárez apresentando no seu perfil altos conteúdos de silte. É esta particularidade na composição granulométrica dos solos que origina uma relativamente alta fragilidade estrutural, e é um dos motivos que a região de Marcos Juárez, através do impulso dado pelo INTA, seja uma das pioneiras na adoção do plantio direto na Argentina. Os solos são escuros, profundos e com boa drenagem, constituindo um típico exemplo de solos com uma boa e ampla aptidão para todo tipo de cultivos (INTA, 1978). O solo da série Marcos Juárez é escuro, profundo e bem drenado, e localiza-se em lombadas planas. O perfil típico foi descrito a 13,5 km da cidade de Marcos Juárez,



apresentando-se a seguir a descrição morfológica e os dados analíticos, segundo INTA (1978):

Descrição Morfológica perfil de solo Série Marcos Juárez

A<sub>p</sub> 0-19 cm, 10YR 3/2 (úmido); franco siltoso; estrutura em blocos sub-angulares, média, moderados e granular; transição abrupta e plana.

BA 19-26 cm, 10YR 3/3 (úmido); franco argilo siltoso a franco siltoso; estrutura em blocos angulares e sub-angulares média, moderada; levemente plástico e levemente pegajoso; cerosidade pouca e finas; transição clara e plana.

B<sub>t1</sub> 26-47 cm, 7,5YR 3/2; franco argilo siltoso; estrutura em prismas irregulares, média, moderada que quebram em blocos sub-angulares; plástico e pegajosa; cerosidade abundante e média; transição clara e plana.

B<sub>t2</sub> 47-66 cm, 7,5YR 4/2 (úmido); franco argilo siltoso; estrutura em prismas irregulares médios, moderados que quebram em blocos sub-angulares; plástico e pegajoso; Cerosidade abundante e média; transição gradual e plana

BC 66-94 cm, 7,5YR 4/4 em úmido. Franco siltoso; estrutura em blocos subangulares médios e grossos moderados, cerosidade pouca e muito fina; transição difusa.

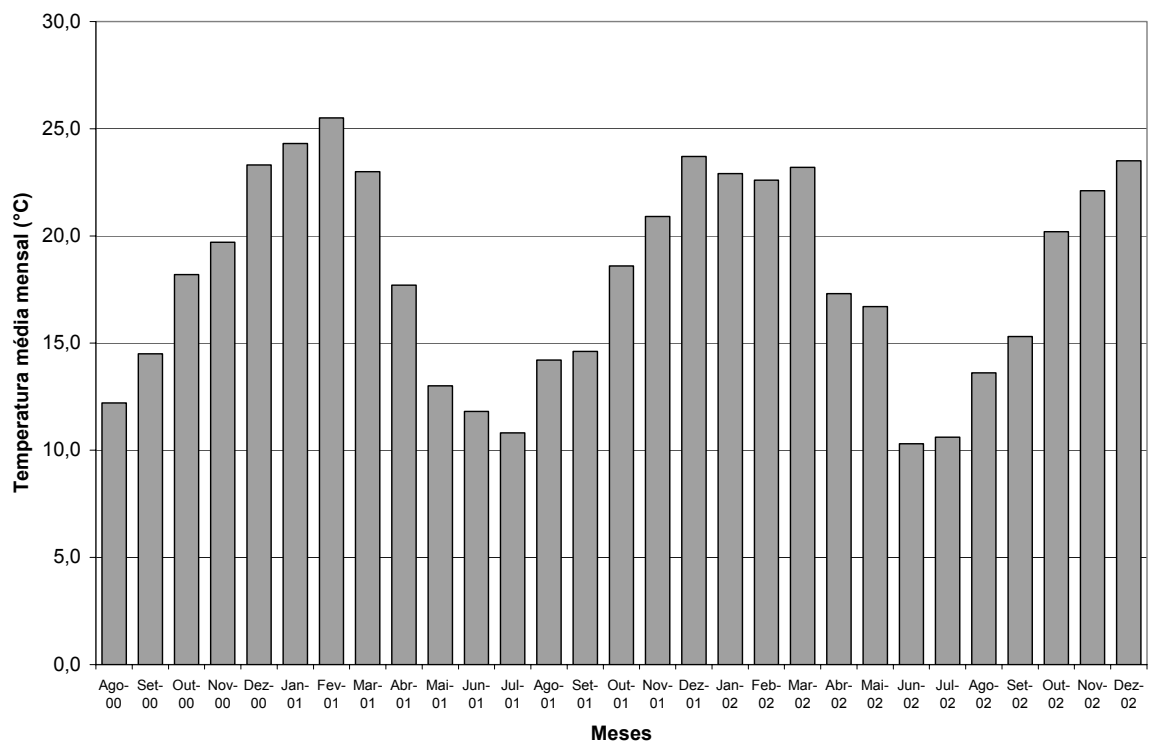
C 94-138 cm, 7,5YR 4/4 (úmido); franco siltoso; maciço; transição abrupta.

C<sub>k</sub> 138-150 cm+, 7,5YR (úmido); franco siltoso; maciço; grande quantidade de concreções calcárias e carbonatos livres na matriz

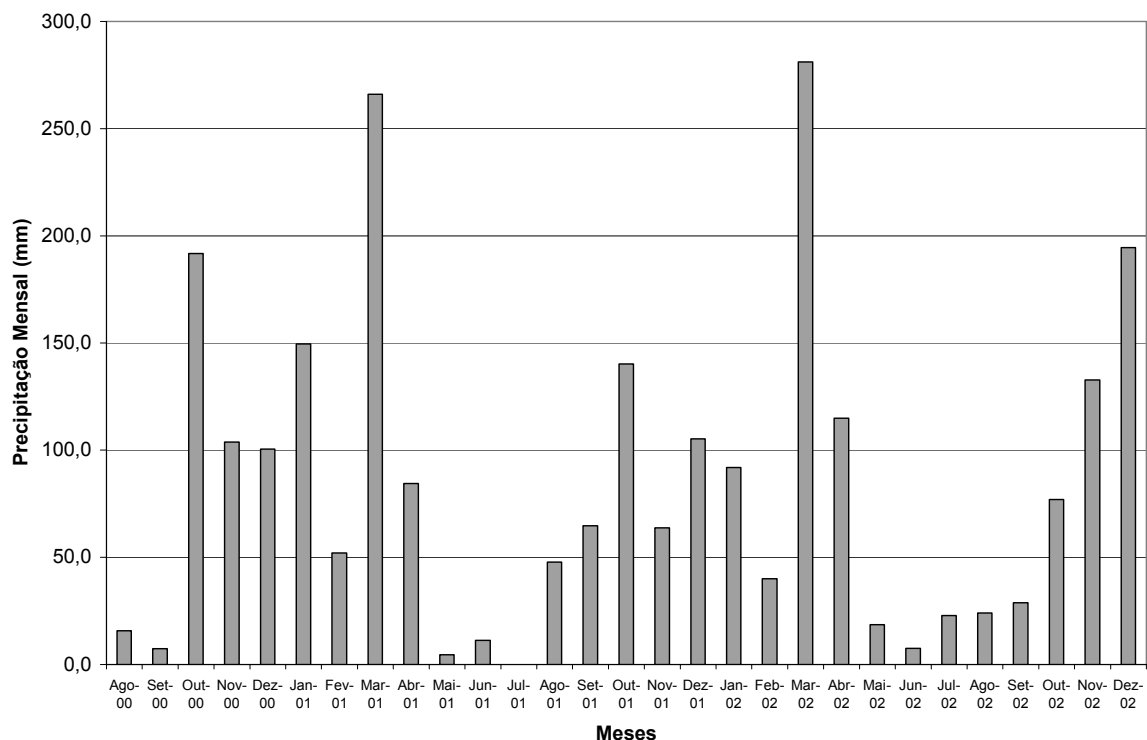
Os dados analíticos do perfil são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Dados analíticos da Série Marcos Juárez.

| Horizonte  | A <sub>p</sub> | BA          | B <sub>t1</sub> | B <sub>t2</sub> | BC          | C           | C <sub>k</sub> |
|--|----------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|
| Profundidade da amostra (cm)   | 4-14           | 19-26       | 29-40           | 52-64           | 74-85       | 95-112      | 140-160        |
| Matéria orgânica %   | 3,26           | 2,33        | 1,20            | 0,68            | 0,34        | 0,27        | 0,10           |
| Carbono orgânico %   | 1,9            | 1,3         | 0,7             | 0,4             | 0,2         | 0,16        | 0,06           |
| Nitrogênio total %   | 0,18           | 0,12        | 0,09            | 0,07            | 0,05        | 0,04        | -              |
| Argila %   | 25,1           | 27,1        | 34,5            | 32,1            | 25,2        | 19,3        | 16,3           |
| Silte %  | 68,9           | 60,3        | 58,4            | 62,7            | 63,1        | 71,2        | 66,4           |
| Areia %  | 6              | 12,6        | 7,1             | 5,2             | 11,7        | 9,5         | 12,4           |
| Calcário, CaCO <sub>3</sub> %  | 0              | 0           | 0               | 0               | 0           | 0           | 4,9            |
| Equivalente de umidade %   | 28,1           | 29,1        | 30,3            | 29,8            | 27,4        | 25,6        | 23,7           |
| pH em água 1:2,5   | 6,4            | 7,0         | 6,9             | 7,1             | 7,3         | 7,7         | 8,3            |
| <b>Cátions trocáveis (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)</b>              |                |             |                 |                 |             |             |                |
| Cálcio   | 10,4           | 11,6        | 14,0            | 15,3            | 13,7        | 13,1        | -              |
| Magnésio   | 4,3            | 4,4         | 5,2             | 5,4             | 4,9         | 5,2         | -              |
| Sódio  | 0,2            | 0,3         | 0,3             | 0,3             | 0,4         | 0,4         | 0,3            |
| Potássio   | 2,6            | 2,1         | 2,1             | 2,3             | 2,4         | 2,5         | 2,7            |
| Hidrogênio   | 6,9            | 6,2         | 5,8             | 5,0             | 3,8         | 2,7         | -              |
| <b>Soma de bases (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)</b>                  | <b>17,5</b>    | <b>18,4</b> | <b>21,6</b>     | <b>23,3</b>     | <b>21,4</b> | <b>21,2</b> | <b>-</b>       |
| <b>Capacidade de troca de cátions (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)</b> | <b>19,3</b>    | <b>20,4</b> | <b>24,4</b>     | <b>24,7</b>     | <b>20,4</b> | <b>21,4</b> | <b>16,5</b>    |

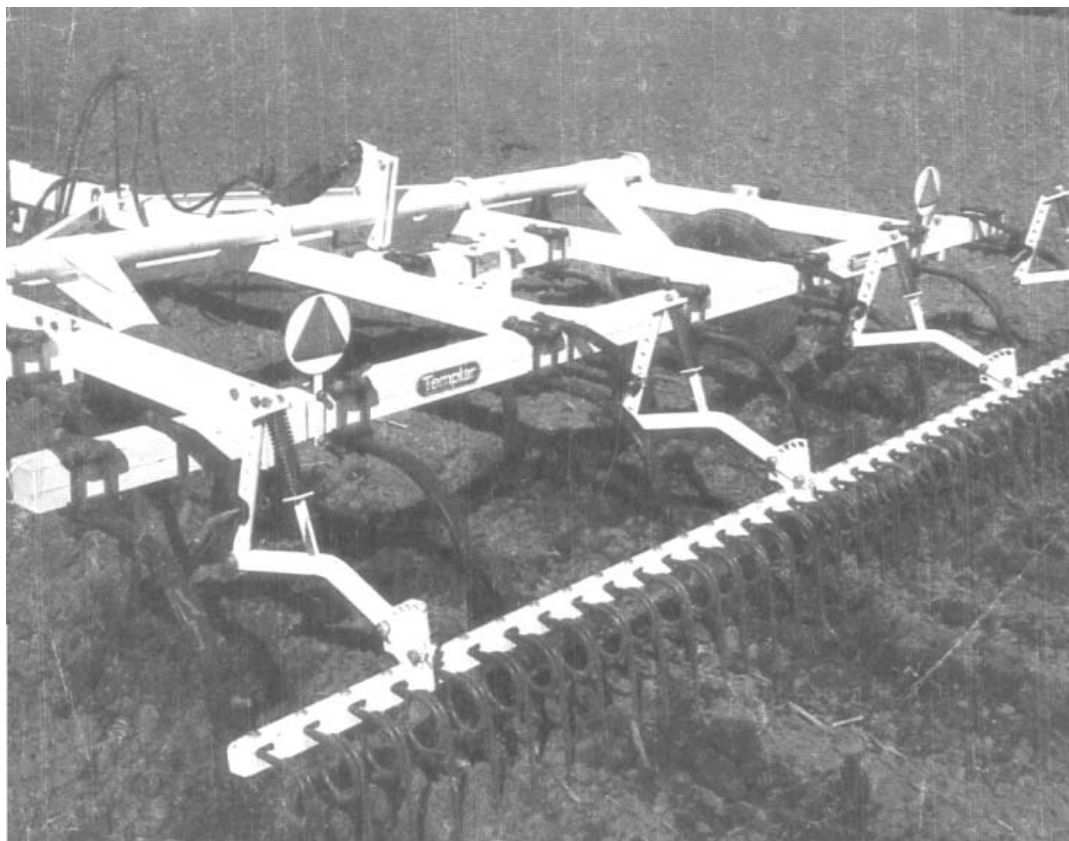


**Figura 3:** Temperaturas médias mensais no período de amostragem.



**Figura 4:** Precipitações mensais no período de amostragem

Para a realização do trabalho utilizaram-se dois ensaios estabelecidos na Estação Experimental. O primeiro deles, chamado de “Ensayo Base” (Figura 5) foi implantado em 1991, com 9 anos no momento de coleta dos dados deste estudo. Trata-se de um desenho em blocos completos ao acaso, em parcelas sub – sub divididas. A rotação é das mais comumente usadas pelos produtores na região (milho – trigo/soja – soja). O fator de análise é o sistema de preparo de solo (plantio direto e preparo reduzido). O preparo reduzido é feito com uma menor quantidade de passadas de maquinaria do que o preparo convencional com arado de aiveca, já quase não usado na região. Nele o arado de aiveca é substituído por uma ferramenta que faz uma aração vertical do solo, baseada na vibração, chamada na região de ‘arado de cinzel’ (Foto 1). Também foi reduzido ao mínimo (uma ou duas) a utilização de grade de disco. O desenho do “Ensayo base” se apresenta na Figura 5.



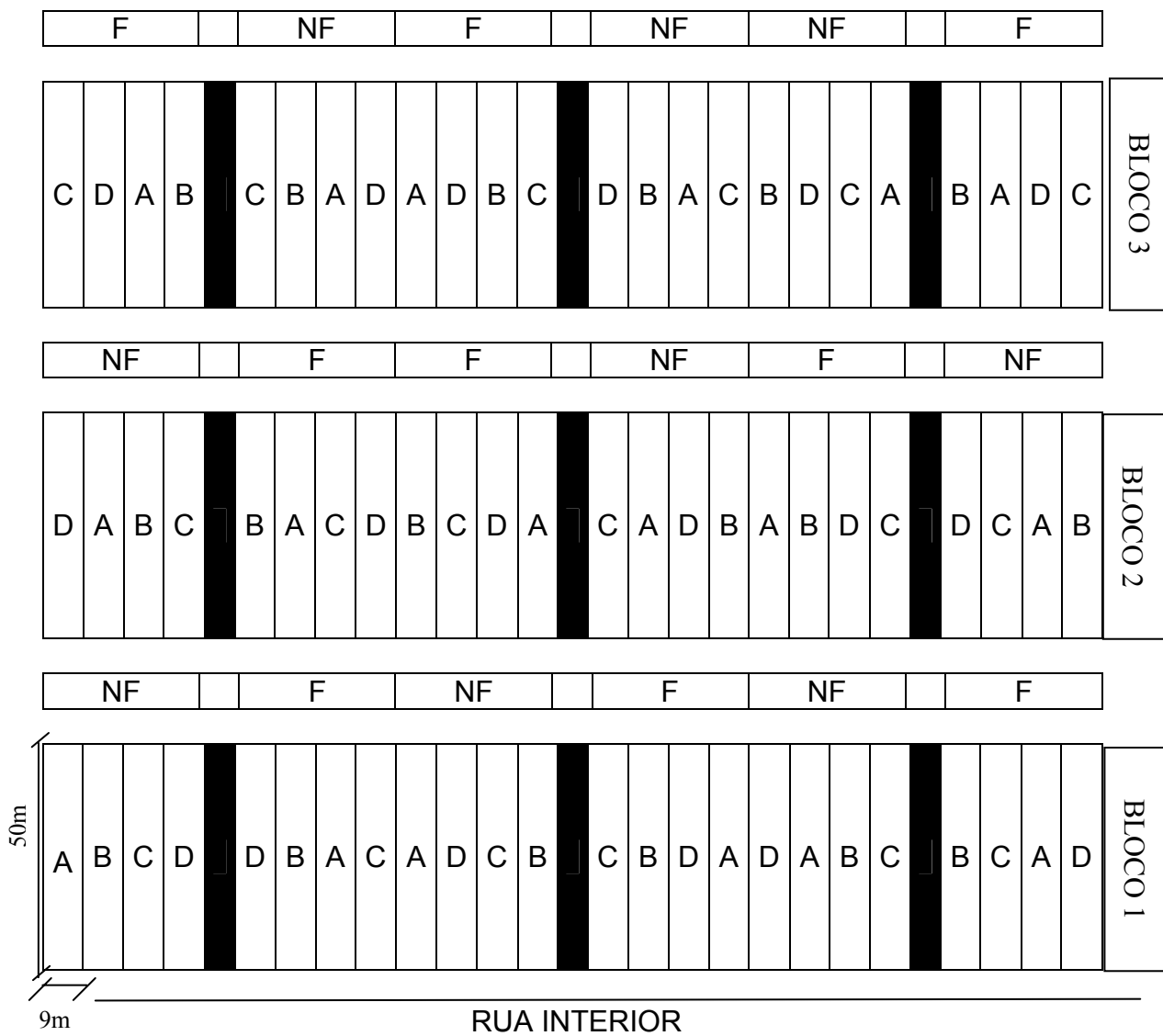
**Foto 1:** Imagem do “arado de cinzel”

Para atingir o primeiro objetivo trabalhou-se somente no “Ensayo Base”. O experimento foi desenhado de maneira que em todos os anos ocorressem todas as fases da rotação em sub-parcelas de 450 m<sup>2</sup> cada uma. Trabalhou-se com aquelas parcelas que apresentavam milho no momento da amostragem. Obtiveram-se amostras de solos e serrapilheira em setembro e dezembro de 2001 e março de 2002 e de plantas em floração e pós-colheita por ocasião das duas últimas amostragens de solos.

As amostras de solos foram tiradas com trado em três profundidades (0-5, 5-10 e 10-20 cm) e foi determinado o teor de carbono orgânico total ((NELSON & SOMMERS, 1982) e avaliada a respiração em laboratório (JENKINSON & POWLSON, 1976).

Das diversas maneiras de fazer as determinações de carbono orgânico apresentadas por NELSON & SOMMERS (1982) utilizou-se a determinação por oxidação via úmida, com uma solução de ácido sulfúrico e ácido fosfórico e titulação do excesso de dicromato de potássio colocado com sulfato ferroso amoniacal (Sal de Mohr). O valor de carbono oxidável obtido foi corrigido por um fator obtido em trabalho de RICHTER et al. (1973), que é uma média de valores para diferentes solos do Pampa argentino.

ALFAFA + GRAMÍNEAS



DESENHO: Parcelas subdivididas em blocos com 3 repetições.  
 Fator principal: Cultivo inicial da seqüência: Soja; Milho; Trigo/Soja. Em qualquer momento acham-se todas as culturas nas parcelas  
 Sub-fator: Sistema de preparo de solo.  
**A: PREPARO REDUZIDO:** Preparo primário com ‘arado de cinzel’ e uma passada de grade de disco  
**B: PLANTIO DIRETO**  
**C e D:** Tratamentos de preparo de solo não usados neste trabalho  
**NF: Não Adubado; F: Adubado** (em milho, 80 kg N; 10 kg P e 7 kg de S)

**Figura 5:** Desenho experimental do “Ensayo Base”

Quanto à respiração de laboratório, identificada neste trabalho como carbono potencialmente mineralizável (FRANZLUEBBERS et al., 1995), as determinações estiveram baseadas numa parte do método usado por JENKINSON & POWLSON (1976) para estimar a biomassa microbiana por fumigação – incubação. O solo a ser avaliado é colocado em vidros e estes são dispostos, junto com um outro vidro contendo 10 ml de NaOH, em um vidro maior, hermeticamente fechado e deixados na escuridão durante 7 dias. Após os 7 dias se faz uma titulação do álcali que não reagiu com o CO<sub>2</sub> liberado (excesso), com fenolftaleína como indicador. A determinação é então idêntica à realizada no método de JENKINSON & POWLSON (1976) com as amostras não fumigadas.

Determinou-se também a densidade do solo das diferentes camadas, com o objetivo de conhecer o peso da camada e passar a percentagem de C para massa desse elemento. As determinações foram feitas com anel volumétrico, sendo as amostras secas até peso constante. No campo fizeram-se determinações de respiração *in situ* nos momentos de amostragem e em outros intermediários, seguindo a metodologia que descrevem ALVAREZ et al. (1998) e que se ilustra na Foto 2. Seis cilindros por parcela, de 51,53 cm<sup>2</sup> de superfície e 15 cm de altura, foram inseridos no solo até uma profundidade de 5 cm. Dentro deles, foi colocado um vidro com álcali e foram fechados com 10 folhas de náilon grosso, presas com liga elástica e mais uma folha de papel de alumínio pelo lado de fora. Os vidros foram deixados no campo por 5 dias e depois retirados, tampados de imediato e levados ao laboratório para quantificação do excesso de NaOH e cálculo da quantidade de CO<sub>2</sub> evoluído do solo.



**Foto 2:** Detalhe das câmaras para medir respiração no campo. À esquerda o cilindro correspondente ao branco.

No caso deste trabalho, fizeram-se 4 medições de respiração, três delas coincidindo com os momentos de retirada de amostras de solo, e mais uma, intermediária entre o momento de pousio - pré-plantio e a floração; período onde supunha-se haver uma mudança importante na atividade biológica devido ao incremento de temperatura típico da região.

Apesar de não existirem dúvidas de que não há maior precisão possível de obter-se que fazendo um maior número de medições, a consulta à bibliografia mostraram que uma interpolação lineal é possível com certo nível de exatidão, tendo em conta uma

evolução muito próxima do nível de CO<sub>2</sub> evoluído com as temperaturas, como se observa, por exemplo, nos trabalhos de ALVAREZ et al. (1996, 1998) e ALVAREZ (1999).

As amostras de plantas e serrapilheira (Foto 3) foram secas em estufa a 60 °C até peso constante, para determinar o peso de matéria seca. Avaliou-se também o rendimento final, seja em matéria seca total, seja em quantidade de grão. Para avaliação de resíduos de plantas usou-se um anel de arame de 0,25 m<sup>2</sup> lançado 6 vezes ao acaso em cada uma das parcelas. Para determinação de rendimento em planta colheram-se plantas das fileiras (com 6 repetições) representando a superfície de um hectare, tomando em conta que 1 hectare possui 14285 m lineares de planta, com o milho plantado em 0,7 m de distância entre fileiras. A cultura comportou-se em forma normal durante todo o ciclo, sem deficiências notáveis de água nem nutrientes, nem problemas sanitários de importância, que não pudessem ser controlados com os tratamentos de rotina.



**Foto 3:** Coleta da palhada no momento de pousio - pré plantio, usando o anel de arame.

Existem duas possibilidades de calcular o estoque de carbono no solo. A maneira mais tradicional, na qual muitos trabalhos já foram feitos, envolve retirada de amostras até uma determinada profundidade e, baseando-se na massa de solo obtida até essa profundidade, calcula-se a quantidade de carbono existente.

Porém, ao longo do tempo, as práticas agrícolas de manejo do solo, aliadas ao tráfego de máquinas na área de cultivo, causam um adensamento da camada superficial de solo, em relação às áreas naturais sob vegetação nativa (SISTI, 2001), ou mesmo quando comparadas com práticas de diferente nível de atividade. Nestas situações, se considerarmos uma mesma profundidade de duas áreas, seja uma agrícola e outra sob pastagem ou duas áreas agrícolas com diferente intensidade de trabalho sobre o solo, acha-se maior massa de solo naquele tratamento que o adensa mais. Logo, ao calcular-se a quantidade de carbono nestas duas condições pode-se achar maiores conteúdos de carbono sobre as áreas mais adensadas, pelo simples fato de possuírem maiores quantidades de solo. Isto pode levar a uma interpretação errônea dos resultados (VELDKAMP, 1994; NEILL et al., 1997).

Para comparar os estoques de carbono, foram calculados os pesos das camadas de 0-20 cm, tomando em conta as densidades do solo das três frações em que foram divididas todas as amostras. Para o cálculo do estoque de C das profundidades

amostradas foi considerado o teor de C de cada intervalo de profundidade avaliado. Para obter valores de referência e perceber-se qual poderia ser a margem de erro, determinou-se também o conteúdo de carbono tomando em conta somente as profundidades, mas com a intenção de fazer uma análise crítica e ilustrativa e não para se utilizar na confecção do balanço de C.

Para cumprir o segundo objetivo do estudo foi necessário, além da utilização do “Ensayo Base” usar mais um ensaio que, internamente no INTA foi chamado de “Ensayo de Compactación” devido a que o estudo da compactação dos solos pelos diferentes sistemas de preparo foi o seu primeiro objetivo. Este ensaio também é um desenho em blocos completos ao acaso, com três repetições. Há 11 anos que vem se implantada a monocultura de milho sob três diferentes sistemas de preparo do solo (plantio direto, preparo reduzido e preparo convencional com arado de aiveca), semeando em cada oportunidade os híbridos mais comumente usados na região. O preparo reduzido foi feito da mesma maneira que no “Ensayo base”. Isto quer dizer que dois dos sistemas de preparo são exatamente iguais àqueles usados no “Ensayo Base”. O tipo de solo também é o mesmo, estabelecendo-se uma diferença somente na rotação, com monocultura de uma planta C4 num caso, e rotação com alternância de espécies C3 e C4 no outro. Os solos nos dois experimentos são muito homogêneos no que faz à unidade taxonômica presente.

Para este segundo objetivo, além das amostras nas parcelas já mencionadas, foram escolhidos três sítios como referência que apresentavam as características mencionadas a seguir.

O primeiro deles foi chamado de ‘Parcela de Referência 10 anos’ (Foto 4). É uma parcela que foi semeada no mesmo momento do “Ensayo base”, ficando nas redondezas dele (ver parcela alfafa + gramíneas na Figura 5). Possui uma largura igual à do experimento e o comprimento de um bloco (50 metros). Após o plantio foi deixada sem cuidado nenhum. No início foi uma pastagem mista de gramíneas e leguminosas (principalmente alfafa, *Medicago sativa*). Hoje resta pouca alfafa devido à maior competitividade das gramíneas, achando-se em abundância *Bromus unioloides* e *Festuca arundinacea* (C3). Também há importante presença de *Phalaris augusta* (C3) e no estrato inferior *Cynodon plectostachyum* (C4)

Outro dos sítios de referência corresponde ao parque da Estação Experimental, que segundo os pesquisadores do INTA tem, no mínimo, 30 anos sem interferência humana. Somente a grama é cortada mas sem ser retirada do local. Por isso foi chamado de ‘Parcela de Referência 30 anos’. Observou-se uma grande quantidade de *Cynodon dactylon* e *Paspalum dilatatum* (ambas C4). O local possui árvores ornamentais dos gêneros *Melia* e *Ulmus*. Pode-se observar na Foto 5 uma vista do Parque da Estação Experimental e na Foto 6 as fileiras de grama cortada que sobraram, de onde também se tomaram 4 amostras, em novembro de 2000, para verificar a composição florística.

Finalmente, num dos limites perimetrais da Estação Experimental do INTA, mas sobre a mesma Série de solos, existe um grande pedaço de terra que os pesquisadores de lá estimam existir há mais de 100 anos sem que seja trabalhada, que fica junto de uma ferrovia, a qual foi denominada ‘Parcela de Referência 100 anos’. Apresentava a composição florística mais diversa, e, em geral, com maior quantidade de plantas C3, excluindo claro uma importante quantidade de *Sorghum halepensis*, a maior erva daninha da agricultura argentina, tipicamente distribuída perto das ferrovias. As espécies mais destacadas foram *Aristida* sp.; *Brisa* sp; *Hordeum* sp; *Artemisia* sp (composta); *Torilis nodosa* (umbelífera); *Rhynchosia* sp. (leguminosa); *Solidago chilensis* (composta); *Melica brasiliana*. Também achou-se alguma quantidade de *Eragrostis polytricha*, planta nativa com anatomia foliar de C4. Já que tinha-se a dúvida



sobre o seu metabolismo de C, foi analisada uma amostra mediante análise de  $\delta^{13}\text{C}$  com espectrômetro de massa, onde ficou claro que a planta é C4. Na Foto 7, apresenta-se uma vista desta pastagem.



**Foto 4:** Vista da parcela ‘Parcela de referência 10 anos’ mostrando inflorescências de *Bromus*, *Festuca* e *Phalaris*, principalmente. No fundo o trigo crescendo no “Ensayo Base”



**Foto 5:** Vista da parcela ‘Parcela de referência 30 anos, mostrando o gramado e a presença de árvores ornamentais.



**Foto 6:** Fileiras de grama cortada no local ‘Parcela de referência 30 anos’ onde foram colhidas amostras de grama para análise de  $\delta^{13}\text{C}$ .



**Foto 7:** Vista da ‘Parcela de Referência 100 anos’. Em primeiro plano inflorescências de *Aristida* sp e *Brisa* sp.

Nas parcelas o solo também não muda se comparado com aquele dos ensaios, sendo a mesma Série Marcos Juárez.

As amostras de solos, seja para os solos dos ensaios ou para as testemunhas, foram tomadas com 6 repetições usando trado e nas profundidades de 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-50; 50-70; 70-90 cm. Determinou-se a densidade do solo superficial com

cilindro (até 15 cm) e em profundidade, também com cilindro mas em trincheiras, segundo as profundidades em que foram obtidas as amostras de solo. Os dados foram confrontados com dados que já tinham sido obtidos pelo INTA em outras ocasiões. As amostras foram analisadas para relações isotópicas de carbono usando a abundância natural de  $^{13}\text{C}$ , através de espectrômetro de massa, além de serem feitas também as análises já descritas para o primeiro objetivo .

Existem estudos que tem demonstrado a utilidade da abundância natural de  $^{13}\text{C}$  para estimar a ciclagem e a dinâmica do C em solos onde as vias fotossintéticas da vegetação original têm mudado (BALESDENT et al. 1987; MARTIN et al. 1990). ANDRIULO et al (1999 a) dizem que a metodologia é muito adequada para identificar a origem do C no solo. As plantas C3 discriminam ‘em contra’ do  $^{13}\text{C}$  no processo de fotossíntese, originando uma tendência para que a razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  da sua fitomassa veja-se esgotada, quando comparadas com as plantas com mecanismo C4. A composição isotópica do C orgânico reflete o tipo de material de onde é originado. Portanto, a incorporação de uma vegetação com um caminho fotossintético diferente provê uma marcação *in situ* que permite a quantificação, seja da perda líquida de matéria orgânica original, seja da taxa de entrada líquida da nova fonte de carbono (JASTROW, et al., 1996).

Tem-se progredido muito em técnicas de espectrometria de massa que permitem aos cientistas de solos usar a pequena variação natural da abundância de dois isótopos estáveis do C ( $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$ ) para determinar o destino do C no solo. Os dois isótopos são discriminados durante os caminhos fotossintéticos das plantas C3 e C4. A abundância natural destes dois isótopos está influenciada pelo tipo de vegetação (FOLLET et al., 1997).

A razão natural  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  é expressa em unidades delta ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ou por mil ( $\delta\text{‰}$ ) .

Por convenção internacional, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  são expressados em forma relativa a um padrão de carbonato de cálcio conhecido como PDB (DE-POLLI, 1999).

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{amostra}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{referência}}} - 1 \right] \times 1000$$

Durante a captação de  $\text{CO}_2$  na fotossíntese, as plantas C3 excluem mais ao  $^{13}\text{C}$  do que as plantas C4. Assim, o trigo, as pastagens anuais de regiões frias e a vegetação de bosque possuem valores de aproximadamente -27‰, enquanto que o milho e os pastos C4 têm valores ao redor de -12‰.

Para a quantificação do C da matéria orgânica da espécie de uso agrícola (C4), ou seja, a taxa de perda da matéria orgânica original e a taxa de ingresso líquido da nova fonte, usará-se o  $\delta^{13}\text{C}$  do solo Testemunha 100 anos, o  $\delta^{13}\text{C}$  do solo sob uso agrícola em monocultura(A) e o  $\delta^{13}\text{C}$  dos resíduos da espécie agrícola (R), neste caso o milho, com um  $\delta^{13}\text{C}$  de aproximadamente -12‰.

Com base nestes valores, faz-se o seguinte cálculo:

X é a fração do C da matéria orgânica do solo derivada da condição anterior

(1-X) é a fração do C da matéria orgânica do solo derivado da nova vegetação introduzida na área (espécie agrícola C4 ou C3 ). Logo:

$A = F.X + R.(1-X)$ , ou  $A = F.X + R - RX$ , ou  $A = R + X.(F - R)$ ; sendo F o  $\delta^{13}\text{C}$  do solo usado como referência e R o  $\delta^{13}\text{C}$  dos resíduos agrícolas

$X = (A - R)/(F - R)$ . Substituindo as letras temos, por exemplo, o cálculo da fração C derivado da MO original – C3, onde:

$$X = \left( \frac{\delta^{13}C_{\text{mistura}} - \delta^{13}C_4}{\delta^{13}C_3 - \delta^{13}C_4} \right) \times 100$$

$\delta^{13}C_{\text{mistura}}$  = Composição Isotópica de C do solo agrícola (mistura de resíduos de plantas C3 e C4 determinando um  $^{13}C$  PDB (‰) da MO do solo na condição atual);

$\delta^{13}C_3$  = Composição Isotópica do C da MO do solo derivado da vegetação nativa (na maioria C3) ou da composição vegetal anterior à mudança da vegetação -  $\delta^{13}C$  PDB (‰);

$\delta^{13}C_4$  = Composição Isotópica de C do resíduos de plantas introduzidas (no caso C4) em  $\delta^{13}C$  PDB (‰);

X = Contribuição % de resíduos de plantas C3 em mistura de plantas C3 e C4 ;

100 – X = Contribuição % de resíduos de plantas C4 em mistura de plantas C3 e C4

A análise estatística usada foi ANOVA e no caso em que se apresentaram diferenças significativas usou-se o teste de comparação de médias de Tukey. Quando preciso, usou-se também o teste ‘t’ de Student.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Conteúdo de Carbono Orgânico Total no Solo.

As medições de carbono orgânico total do solo, considerando todas as amostragens feitas, variaram entre 17,3 e 8,2 g kg<sup>-1</sup>, em média, sempre tomando em conta parcelas cultivadas, seja com plantio direto, seja com preparo reduzido (Tabela 3). As parcelas de referência, com, no mínimo, 10 anos de pastagem apresentaram teores de C que ultrapassavam sempre o 2%. Estes dados estão em concordância com outros de solos similares (COSTANTINI et. al., 1999) ou ainda mais arenosos, também pertencendo ao Pampa (DIAZ ZORITA, 1999). Em alguns locais da Estação Experimental do INTA em Marcos Juárez, observam-se conteúdos de carbono que estão acima do 3 g kg<sup>-1</sup>. Segundo informações de pesquisadores da Estação Experimental, essas terras possuem no mínimo, 100 anos sem serem trabalhadas (Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> Carlos Galarza, comunicação pessoal). Estes níveis de carbono orgânico no solo não são usuais para o setor do Pampa em estudo, embora possam ser achados comumente (e com valores ainda maiores) na região sudeste do Pampa, perto dos sistemas serranos, como por exemplo nos solos citados por ECHEVERRIA et al. (1993).

**Tabela 3:** Carbono orgânico total do solo (g kg<sup>-1</sup>) para os sistemas de preparo analisados em diferentes profundidades e momentos de amostragem da cultura de milho.

| Amostragem   | Sistema de Preparo | Profundidade no perfil (cm) | C orgânico total (g kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Pré-plantio  | Reduzido           | 0-5                         | 13,2                                   |
|              |                    | 5-10                        | 11,8                                   |
|              |                    | 10-20                       | 9,8                                    |
|              | Plantio Direto     | 0-5                         | 14,2                                   |
|              |                    | 5-10                        | 11,1                                   |
|              |                    | 10-20                       | 9,6                                    |
| Floração     | Reduzido           | 0-5                         | 11,7                                   |
|              |                    | 5-10                        | 10,7                                   |
|              |                    | 10-20                       | 8,5                                    |
|              | Plantio Direto     | 0-5                         | 13,1                                   |
|              |                    | 5-10                        | 9,9                                    |
|              |                    | 10-20                       | 8,3                                    |
| Pós-colheita | Reduzido           | 0-5                         | 13,5                                   |
|              |                    | 5-10                        | 13,9                                   |
|              |                    | 10-20                       | 10,0                                   |
|              | Plantio Direto     | 0-5                         | 17,3                                   |
|              |                    | 5-10                        | 11,8                                   |
|              |                    | 10-20                       | 10,4                                   |

A análise estatística feita com ANOVA apresentou diferenças significativas para o momento de amostragem e para as diferentes profundidades ( $P < 0,01$ ), não se observando diferenças com significância para o sistema de preparo de solo. É possível que, caso fossem avaliadas frações mais lábeis do que o carbono orgânico total, como

por exemplo a biomassa-C, houvessem-se apresentado algum tipo de variação com o sistema de preparo usado, devido à maior sensibilidade deste indicador (COSTANTINI, et al., 1996).

Os conteúdos de carbono orgânico total apresentaram a estratificação esperada, mesmo que existindo uma interação significativa ( $P < 0,01$ ) entre sistema de preparo e profundidade. Isto ocorre, sem dúvida devido ao efeito de acumulação superficial da matéria orgânica provocado pelo plantio direto, em confronto com uma distribuição mais homogênea que se faz no preparo reduzido, mesmo que este último não movimente tanto o solo como o preparo com arado de aiveca.

Os conteúdos de carbono orgânico total médios para os diferentes momentos de amostragem apresentam uma distribuição que parece se relacionar mais com o regime de temperatura do local, do que com um estado fenológico da cultura. Maiores percentagens se apresentaram no momento de pousio- pré-plantio (em setembro de 2001, o momento que teve anteriormente as temperaturas mais baixas) e os menores após o verão, na pós-colheita em março de 2002, como se pode ver na Tabela 4:

**Tabela 4:** Valores médios de carbono para os diferentes momentos de amostragem.

| Amostragem   | Carbono orgânico total<br>(g kg <sup>-1</sup> ) |
|--|---|
| Pousio – Pré-plantio (final inverno – principio primavera) | 12,7 a  |
| Floração (inicio do verão)                                 | 11,6 ab   |
| Pós-colheita (final do verão)                              | 10,3 b  |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Teste de Tukey,  $P < 0,05$ )

#### 4.2. Conteúdo de Carbono Potencialmente Mineralizável no Solo.

FRANZLUEBBERS et al. (1995) conceituam como carbono potencialmente mineralizável aquele carbono obtido pelo método de JENKINSON & POWLSON (1976) na avaliação da respiração em laboratório, o que em verdade faz parte da determinação de biomassa-C pelo método de fumigação-incubação. Neste trabalho, a determinação foi feita com esse propósito, já que não era a intenção nem valorar quantidade nem atividade microbiana, como realmente se faz quando biomassa microbiana ou respiração são determinadas.

Mesmo que as determinações não permitam calcular com exatidão uma quantidade de carbono potencialmente mineralizável, já que as determinações são quantificadas por hora, e esses pulsos são variáveis segundo o momento em que a incubação ocorre, esta medição permite observar para um momento determinado, as quantidades de carbono potencialmente mineralizáveis, quando as amostras são colocadas em condições ótimas de incubação no que diz respeito à temperatura e umidade.

Os resultados de carbono facilmente mineralizável, medidos por este método são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Carbono facilmente mineralizável nos solos sob diferentes sistemas de preparo, para as diferentes profundidades e momentos de amostragem na cultura de milho.

| Amostragem   | Sistema de Preparo | Prof. no perfil (cm) | C potenc. min. ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo hora <sup>-1</sup> ) |
|--------------|--------------------|----------------------|---|
| Pré-plantio  | Reduzido           | 0-5                  | 0,382   |
|              |                    | 5-10                 | 0,225   |
|              |                    | 10-20                | 0,146   |
|              | Plantio Direto     | 0-5                  | 0,457   |
|              |                    | 5-10                 | 0,170   |
|              |                    | 10-20                | 0,238   |
| Floração     | Reduzido           | 0-5                  | 0,476   |
|              |                    | 5-10                 | 0,448   |
|              |                    | 10-20                | 0,211   |
|              | Plantio Direto     | 0-5                  | 0,673   |
|              |                    | 5-10                 | 0,233   |
|              |                    | 10-20                | 0,287   |
| Pós-colheita | Reduzido           | 0-5                  | 0,377   |
|              |                    | 5-10                 | 0,190   |
|              |                    | 10-20                | 0,244   |
|              | Plantio Direto     | 0-5                  | 0,324   |
|              |                    | 5-10                 | 0,261   |
|              |                    | 10-20                | 0,216   |

As tendências apresentadas na análise foram semelhantes àquelas mostradas para carbono orgânico total, o que faz pensar mais uma vez, que para achar diferenças deveria-se recorrer a frações ainda mais lábeis (COSTANTINI et al., 1996). Mais uma vez os sistemas de preparo não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Também observou-se a mesma estratificação em profundidade.

O conteúdo de carbono facilmente mineralizável foi significativamente maior na amostragem de floração, o que se pode atribuir a uma maior rizodeposição no estado de floração. Este fato já foi descrito por FRANZLUEBBERS et al. (1995) e COSTANTINI et al. (1999). Os dados são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Valores médios de carbono facilmente mineralizável para os diferentes momentos de amostragem

| Amostragem   | Carbono pot. mineralizável ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo hora <sup>-1</sup> ) |
|--|---|
| Floração (início do verão)                                 | 0,370 a   |
| Pousio – Pré-plantio (final inverno – princípio primavera) | 0,269 b   |
| Pós-colheita (final do verão)                              | 0,257 b   |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Teste de Tukey,  $P < 0,05$ )

### 4.3. Rendimentos da Cultura de Milho em Matéria Seca Total e em Grão.

Continuando com a descrição das partes do sistema solo-planta que armazenam carbono no ciclo da cultura de milho, apresentam-se a seguir dados de rendimento da cultura de milho, e a partição destes componentes para as diferentes partes da planta.

Aplicando-se o teste “t” não se encontraram diferenças de significação estatística para o estágio de floração no número de plantas por hectare. Também não se encontraram para os rendimentos, que apresentaram médias iguais (Tabela 7).

Os resultados finais do cultivo de milho se apresentam na Tabela 8. Como aconteceu na floração, não foram observadas diferenças nem para a densidade de plantas na colheita nem para o rendimento em matéria seca total da planta. Também não houve diferença significativa quanto à partição de matéria seca para grãos. Os rendimentos foram muito semelhantes nos dois sistemas de preparo, e, portanto, o resíduo que volta para a superfície é quase da mesma quantidade, e, obviamente, da mesma qualidade, já que é o mesmo híbrido de milho o que foi plantado.

**Tabela 7:** Valores de densidade de planta, rendimento e partição da matéria seca da planta para a cultura de milho no estágio de floração

| Tratamento | Densidade<br>(planta ha <sup>-1</sup> ) | Rendimento<br>MS(Mg ha <sup>-1</sup> ) | %<br>talo+bainha | %<br>folha   | %<br>Espiga  |
|------------|---|--|------------------|--------------|--------------|
| PR         | 72619 ± 4908                            | 10,350 ± 0,808 a                       | 48,97 ± 2,87     | 28,17 ± 2,22 | 22,86 ± 4,09 |
| PD         | 78571 ± 5832                            | 10,495 ± 1,838 a                       | 49,87 ± 1,72     | 29,44 ± 1,50 | 20,69 ± 2,31 |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Teste de Tukey, P<0,05)

Legenda: PR= preparo reduzido; PD=plantio direto; Rendimento MS=rendimento em matéria seca da cultura

Os rendimentos da cultura de milho podem ser considerados como razoáveis para as condições em que se desenvolveu a cultura, sem estresse d'água e com níveis de fertilização médios. Na região, os cultivos com níveis de adubação mais altos podem atingir produções ainda maiores, sempre que se apresentarem boas condições hídricas, principalmente no momento da floração (Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> Carlos Galarza, comunicação pessoal).

O carbono fotossintetizado é retido nos grãos é exportado do sistema solo planta, enquanto o carbono seqüestrado em órgãos vegetativos vai para o solo, podendo acrescentar o estoque de carbono, e passando a integrar as diferentes frações, em função do preparo do solo e das condições climáticas.

Os conteúdos de carbono das plantas de milho apresentam valores relativamente constantes. Neste trabalho foi usado para estimar a quantidade de carbono o fator 0,45 (45% de C na matéria seca das plantas de milho), citado por SISTI (2001).



**Tabela 8:** Valores de densidade de planta, rendimento em matéria seca total e em grão e partição da matéria seca da planta para a cultura de milho no estágio de maturação.

|    | Densidade<br>(planta ha <sup>-1</sup> ) | MST<br>(Mg ha <sup>-1</sup> ) | Rendimento<br>(Mg ha <sup>-1</sup> ) | Proporções   |             |                            |              |
|----|---|-------------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------|----------------------------|--------------|
|    |   |                               |                                      | %talo+bainha | %folha      | %palha de<br>espiga+sabugo | %grão        |
| PR | 72619 ± 4908                            | 18,220 ± 1,863 a              | 10,375 ± 1,608 a                     | 20,50 ± 2,44 | 8,88 ± 1,68 | 13,96 ± 1,01               | 56,66 ± 3,82 |
| PD | 78571 ± 1538                            | 19,221 ± 1,538 a              | 10,964 ± 1,126 a                     | 19,50 ± 3,16 | 9,80 ± 2,84 | 13,76 ± 1,35               | 56,95 ± 2,23 |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Teste de Tukey, P<0,05)

Legenda: PR= preparo reduzido; PD=plantio direto; Rendimento MST=rendimento em matéria seca total da cultura.

Assim, na Tabela 9 apresentam-se as quantidades médias de carbono retidas na planta, na floração, e na planta e nos grãos, imediatamente antes da colheita, que serão usadas para o cálculo do balanço de carbono.

**Tabela 9:** Quantidades de material vegetal e carbono (C) médias (Mg ha<sup>-1</sup>), para milho no estágio de floração e em maturação na planta inteira e nos grãos.

|    | Floração |       | Maturação |       |       |       |        |       |
|----|----------|-------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|
|    | MST      | C     | MST       | C     | PAL   | C     | GRÃO   | C     |
| PR | 10,351   | 4,658 | 18,221    | 8,199 | 7,845 | 3,530 | 10,376 | 4,669 |
| PD | 10,495   | 4,723 | 19,222    | 8,650 | 8,258 | 3,716 | 10,964 | 4,934 |

Legenda: PR= preparo reduzido; PD=plantio direto; Rendimento MST=rendimento em matéria seca total da cultura; PAL=palhada.

Pode-se assumir que os conteúdos de C nas raízes para cada um dos tratamentos são iguais, já que as partições para todos os outros órgãos vegetativos e reprodutivos são. Portanto, o balanço de carbono entre os dois sistemas será comparado de forma relativa e não absoluta. A partir do resultado poderemos saber se um sistema retém mais ou menos carbono, relativamente ao outro sistema, e não em termos absolutos.

Nas amostras da camada de palha em todos os momentos de coleta, verificou-se quantidades maiores de palha no pousio - pré plantio e na maturação. As quantidades obtidas na floração podem ser consideradas como desprezíveis, principalmente se comparadas com a massa vegetal que estava crescendo no local naquele momento. Por outro lado, na amostragem de pós-colheita, mesmo que as quantidades fossem relevantes, deve-se levar em conta que muita da palha colhida no anel fazia parte da que foi contabilizada nas Tabelas 8 e 9. Portanto, para os fins do balanço considerou-se que todo o material que não é grão volta ao solo. De outra maneira poderíamos contar o mesmo material duas vezes.

As quantidades médias de palha nas parcelas sob preparo reduzido e plantio direto foram de 700 kg ha<sup>-1</sup> e 2330 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, e as diferenças foram significativas entre os sistemas de preparo do solo (P<0.01).

#### 4.4. Liberação de CO<sub>2</sub> do solo.

Para o balanço de carbono, é preciso, além da quantificação e descrição dos reservatórios no solo e na planta, ter uma noção do carbono que, na forma de CO<sub>2</sub>, está sendo liberado desde o solo. Esta análise é importante, seja do ponto de vista de uma

perda de matéria orgânica do solo, seja pela liberação à atmosfera de um gás de efeito estufa, que contribui com o aquecimento global.

Na agricultura existe a possibilidade de liberação de outro gás de efeito estufa que contém carbono, o metano. Entretanto, nas condições em que se desenvolveu o experimento (solo com boa drenagem e sem problemas de alagamento em nenhuma das fases da cultura) a emissão de metano foi considerada inexpressiva.

Dentro da metodologia usada para determinação da respiração em campo (ALVAREZ et al., 1998) existem variações que podem ser levadas em conta segundo as necessidades da pesquisa. Assim, num trabalho feito para a região do Pampa, ALVAREZ et al. (1996) estabeleceram uma diferença entre o CO<sub>2</sub> evoluído do solo (incluindo todas as fontes que liberam CO<sub>2</sub>) e o CO<sub>2</sub> evoluído desde as raízes dos cultivos. Assim, por subtração eles calcularam o CO<sub>2</sub> que é liberado pelos microorganismos, que é medido através da atividade microbiana do solo. Neste estudo, sendo o objetivo fazer um balanço de carbono, não consideramos necessário discriminar a origem do CO<sub>2</sub> liberado. Todo esse gás que é retornado para atmosfera, seja qual for sua origem, representa uma saída do sistema.

Os resultados da respiração de CO<sub>2</sub>, quando analisados em conjunto em todos os tempos de amostragem, apresentaram diferenças estatisticamente significativas para o sistema de preparo de solo e para o momento de amostragem, nos dois casos com alto nível de significância (P<0.01). O solo sob preparo reduzido apresentou maiores emissões de CO<sub>2</sub>.

Neste sentido aparecem na literatura dados, que na primeira visão podem até parecer contraditórios. Por exemplo, ALVAREZ (1999) apresenta dados para o Pampa Ondulado semelhantes aos obtidos neste trabalho. Ainda, em ALVAREZ (1999) a respiração no campo é maior em plantio direto do que em parcelas aradas. Acontece neste segundo caso que a cultura é de inverno (trigo) e no verão, momento em que as duas parcelas encontram-se sem cultura, aquela que apresenta maior volume de resíduos de cultura, no momento de máxima temperatura (janeiro – fevereiro) é a que libera mais CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Quanto aos momentos de amostragem (Tabela 10), os valores mais altos de liberação de dióxido de carbono coincidiram com os momentos de maiores temperaturas e crescimento mais intenso da cultura. Os menores valores foram o inicial, influenciado pelo período com temperaturas relativamente mais frias (Figura 3), e o de pós-colheita. Destaca-se que a medição de pós-colheita foi feita em forma tardia (mês de junho, muito após a colheita de milho). Mesmo que baixos, devido em parte à queda da temperatura própria do mês, os valores foram maiores do que na primeira amostragem, devido, provavelmente, à espessa camada de palha que ficou no local.

**Tabela 10:** Valores médios de CO<sub>2</sub> liberado em cada um dos quatro momentos de medição de respiração em campo.

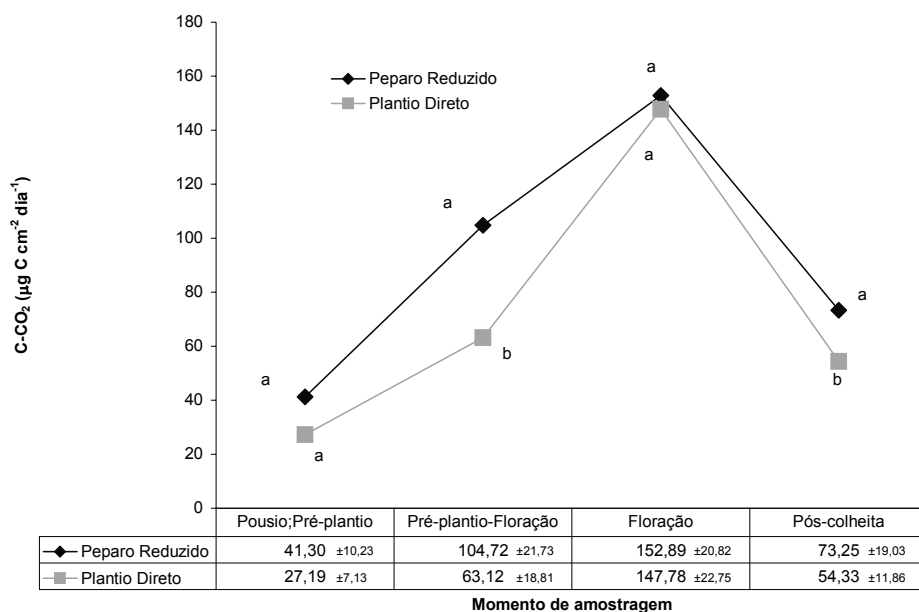
| Momento de Amostragem                          | CO <sub>2</sub> liberado (µg C cm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ) |
|--|---|
| Pousio / pré-plantio(setembro)                 | 34,24 c   |
| Ponto intermédio plantio – floração (novembro) | 83,93 b   |
| Floração (janeiro)                             | 150,34 a  |
| Pós colheita tardia (junho)                    | 63,79 b   |

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Teste de Tukey, P<0,05)

Analisaram-se cada um dos momentos de amostragem separadamente, e sempre, às vezes com diferenças significativas e outras não, o preparo reduzido mostrou uma

taxa de liberação de CO<sub>2</sub> maior. Usou-se o teste “t” de Student e em todos os casos comprovou-se a hipótese da igualdade de variância usando o teste de Bartlett. No tempo de floração, é possível que a grande atividade biológica produzida por uma cultura em ativo crescimento, mascare as diferenças próprias dos sistemas de preparo do solo, e por isso, apresentem valores tão parecidos (COSTANTINI et al., 2002)

A Figura 6 apresenta os valores médios de seis repetições para cada sistema de preparo e momento de medição



**Figura 6:** Liberação de C-CO<sub>2</sub> no campo em função do momento de amostragem

Letras diferentes em cada um dos momentos de amostragem, indicam diferenças significativas (Teste de Tukey, P<0,05)

As comparações feitas permitem conhecer diferenças na liberação de C-CO<sub>2</sub> entre tratamentos. Mas, para fazer um balanço de carbono é preciso calcular a evolução de CO<sub>2</sub> numa unidade de superfície maior do que a que foi apresentada, e fazer interpolações para estimar a liberação de CO<sub>2</sub> nos momentos em que não existem medições.

Dado que fizeram-se as medições num ciclo inteiro, serão usados, para os fins da interpolação os dados dos momentos de pós-colheita tardia (junho) e pousio – pré-plantio do ano anterior (setembro), como se fossem consecutivos. Assim, os valores de liberação de CO<sub>2</sub> por hectare e por dia, serão os que se apresentam na Figura 7, que também mostra o número de dias decorridos entre uma amostragem e a outra, unidade de tempo necessária para as interpolações.

Interpolando os dados pontuais pelo período entre uma medição e outra pode-se construir a Tabela 11 que indica as quantidades médias totais de CO<sub>2</sub> liberado do sistema solo – planta com o objetivo de serem utilizadas no balanço de carbono.

**Tabela 11:** Quantidade total média de C-CO<sub>2</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) liberado entre os diferentes momentos de amostragem.

|                  | Período 1 | Período 2 | Período 3 | Período 4 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Preparo Reduzido | 430,70    | 798,56    | 1695,75   | 558,15    |
| Plantio Direto   | 266,38    | 653,79    | 1515,75   | 383,05    |

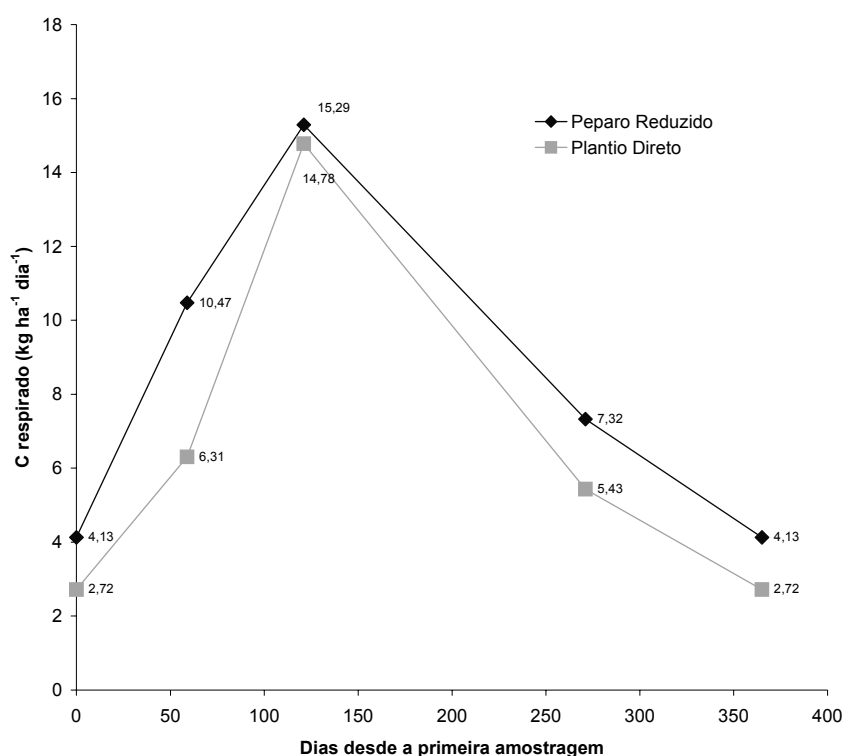
Legenda:

Período 1= Pousio - pré-plantio até tempo intermediário entre plantio e floração

Período 2= Tempo intermediário plantio e floração até plena floração

Período 3= Floração – pós-colheita tardia

Período 4= Interpolação pós-colheita tardia – pré-plantio ano anterior



**Figura 7:** Quantidade de CO<sub>2</sub> liberado por hectare e por dia, em cada uma das amostragens e para cada um dos sistemas de preparo de solo.

#### 4.5. Cálculo do Estoque de Carbono no Solo.

A densidade do solo foi medida para cada uma das camadas em que foram tiradas amostras. Houve uma diferença, estatisticamente significativa, entre plantio direto e preparo reduzido ( $P < 0,01$ ), sendo o primeiro sistema o que apresentou maior adensamento. Também foi observada uma interação altamente significativa ( $P < 0,01$ ) entre profundidade e sistema de preparo. O plantio direto adensa a camada superficial, enquanto no preparo reduzido a densidade do solo é menor do que no plantio direto até a profundidade atingida pelas ferramentas de lavra. Não houve nenhum efeito do momento de amostragem na densidade do solo.

Às vezes, os rendimentos das culturas sob plantio direto podem ser inferiores àqueles feitos com outros sistemas de preparo. Alguns problemas físicos podem ser, ao

menos parcialmente, responsáveis por essa diminuição (MARTINO, 1997). O estado de compactação de um solo determina sua transitabilidade, sua susceptibilidade à erosão e a aptidão para o crescimento vegetal (SCHAFER et al., 1992 citado em MARTINO, 1997). É útil destacar que neste trabalho foram feitas medições de densidade do solo e não de resistência à penetração.

Na Tabela 12 se apresentam os dados de percentagem de carbono junto com as massas de solo de cada uma das camadas amostradas. O efeito de adensamento de algumas camadas produz uma superestimação, se os dados foram tomados baseados na profundidade e não na massa de solo, a qual, resultou em diferenças estatisticamente significativas no estoque de C para o plantio direto (Tabela 13).

**Tabela 12:** Massa das camadas de solo, estoques de carbono em função da profundidade e da massa, com referência ao padrão estabelecido em cada camada, e estoques acumulados para os sistemas de preparo, nas diferentes camadas e profundidades de amostragem

|              |    | Prof. (cm) | C (g kg <sup>-1</sup> ) | Peso camada (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Estoque C camada na (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Estoque C acumulado 20cm (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Estoque C na camada em peso (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Estoque C acumulado em igual massa (Mg ha <sup>-1</sup> ) |
|--------------|----|------------|-------------------------|------------------------------------|--|---|--|---|
| Pré-plantio  | PR | 0-5        | 13,22                   | 555,00                             | 7,337                                      |   | 7,337  |   |
|              |    | 5-10       | 11,84                   | 570,00                             | 6,749                                      | 27,150  | 6,749  | 27,150  |
|              |    | 10-20      | 9,83                    | 1329,00                            | 13,064                                     |   | 13,064   |   |
|              | PD | 0-5        | 14,24                   | 621,50                             | 8,850                                      |   | 7,903  |   |
|              |    | 5-10       | 11,10                   | 645,00                             | 7,160                                      | 28,175  | 6,536  | 27,457  |
|              |    | 10-20      | 9,64                    | 1262,00                            | 12,166                                     |   | 13,018   |   |
| Floração     | PR | 0-5        | 11,68                   | 560,00                             | 6,541                                      |   | 6,482  |   |
|              |    | 5-10       | 10,67                   | 590,00                             | 6,295                                      | 24,066  | 6,087  | 22,670  |
|              |    | 10-20      | 8,45                    | 1329,00                            | 11,230                                     |   | 10,107   |   |
|              | PD | 0-5        | 13,14                   | 640,00                             | 8,410                                      |   | 7,293  |   |
|              |    | 5-10       | 9,91                    | 655,00                             | 6,491                                      | 25,378  | 5,923  | 24,462  |
|              |    | 10-20      | 8,25                    | 1270,00                            | 10,478                                     |   | 11,246   |   |
| Pós-colheita | PR | 0-5        | 13,48                   | 537,56                             | 7,246                                      |   | 7,481  |   |
|              |    | 5-10       | 13,86                   | 599,72                             | 8,312                                      | 28,778  | 7,907  | 28,660  |
|              |    | 10-20      | 9,95                    | 1328,63                            | 13,220                                     |   | 13,272   |   |
|              | PD | 0-5        | 17,30                   | 567,32                             | 9,815                                      |   | 9,602  |   |
|              |    | 5-10       | 11,78                   | 639,28                             | 7,531                                      | 30,416  | 6,783  | 30,268  |
|              |    | 10-20      | 10,36                   | 1261,68                            | 13,071                                     |   | 13,864   |   |

Os dados finais de estoque resumem-se na Tabela 13.

**Tabela 13:** Valores médios de estoque de C para os primeiros 20 cm e para igualdade de volumes comparados

|                  | Estoque C na camada de 20 cm superficiais (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Estoque de C para massas iguais (Mg ha <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--|--|
| Preparo Reduzido | 26,66 a  | 26,16 a  |
| Plantio Direto   | 27,99 b  | 27,39 a  |

Letras diferentes numa mesma coluna indicam diferenças significativas (Teste de Tukey, P<0,05)

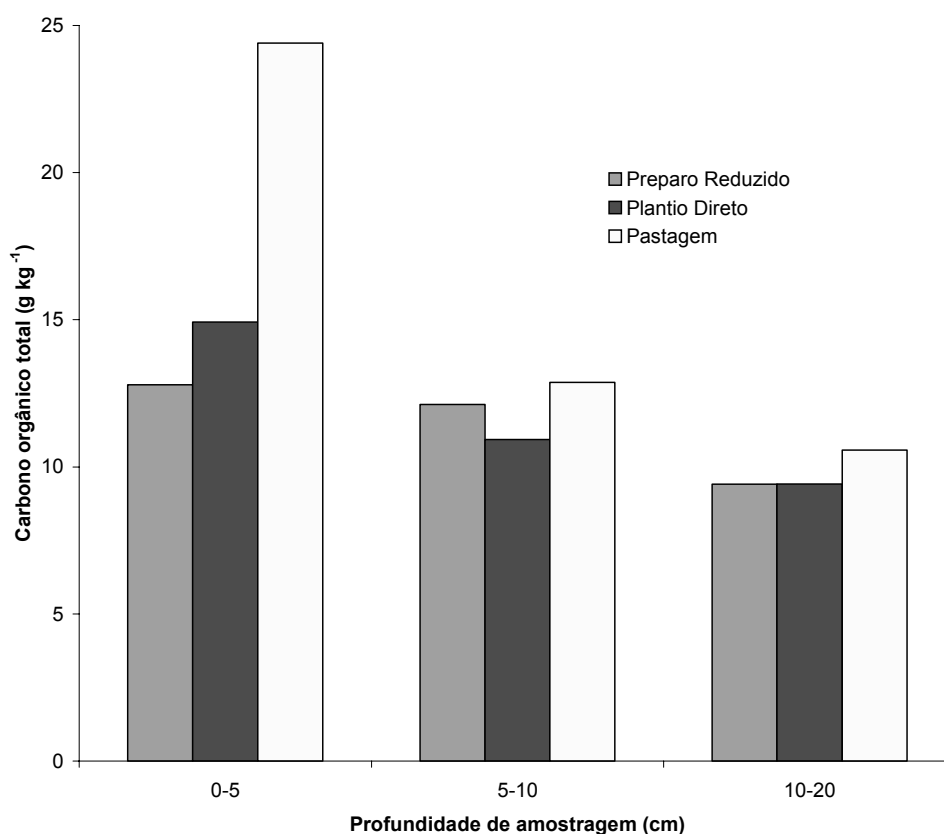
Fica claro então o erro cometido ao calcular a quantidade de carbono por unidade de volume. Nesta parte do estudo, que considerou somente os primeiros 20 cm de solo, não se apresentaram diferenças no estoque de carbono no solo entre os dois sistemas usados. Mais adiante vão se considerar outras situações, atingindo uma profundidade maior, no mesmo tipo de solo.

Até aqui os dados não apresentam uma diferença de estoque de C no solo para as duas situações tratadas. Os efeitos podem ser diferentes segundo os casos (DICK et al., 1991) sendo necessário ter cautela na generalização deste tipo de resultados.

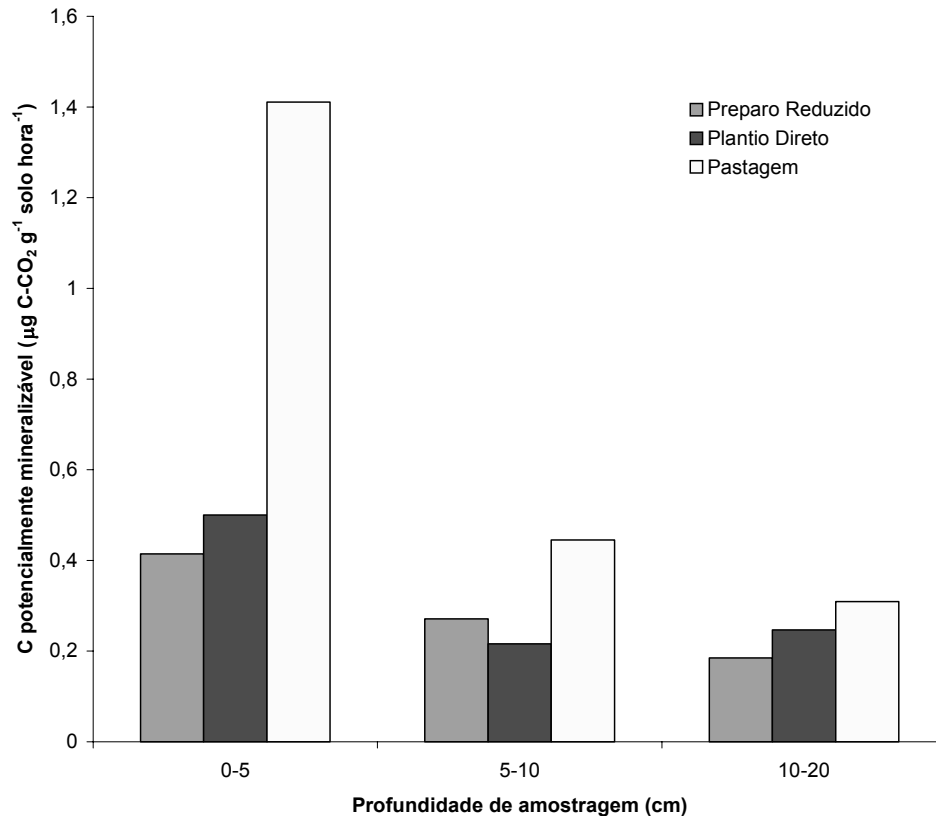
#### 4.6. Comparações com as Pastagens

Embora as comparações não tenham rigor estatístico, já que a parcela de referência usada está fora do desenho do experimento, o cuidado que elas receberam por parte da equipe da Estação Experimental do INTA e a localização muito próxima ao experimento conferem a elas, no mínimo, um valor ilustrativo importante.

O sítio é aquele descrito como 'Parcela de Referência de 10 anos' na seção Material e Métodos. Para fins de comparação se apresentam na Figura 8 os valores médios de carbono orgânico total nos dois sistemas de preparo e na pastagem e na Figura 9 os valores correspondentes ao carbono potencialmente mineralizável.



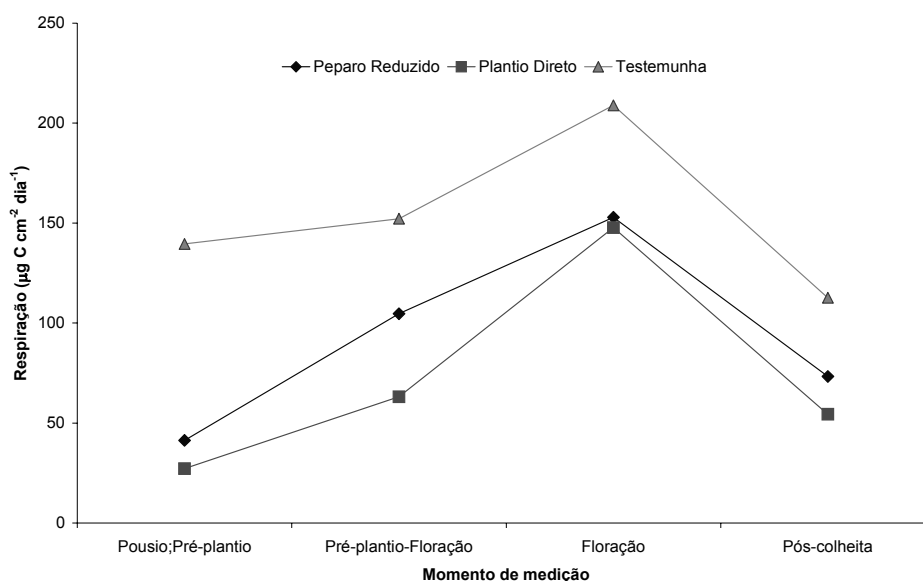
**Figura 8:** Valores médios de carbono orgânico total dos solos sob cultivo em comparação com a área de pastagem.



**Figura 9:** Valores médios de carbono potencialmente mineralizável dos solos sob cultivo em comparação com a Parcela de Referência de 10 anos.

Na Figura 8 pode-se observar a maior concentração percentual de C orgânico total na pastagem, principalmente na camada superficial, o que é explicado pela espessa camada de serrapilheira na área, que foi retirada antes da coleta das amostras. Esse material possivelmente contribuiu para o maior teor de frações leves de matéria orgânica, como pode se observar pelo maior teor de C potencialmente mineralizável (Figura 9).

As medições de respiração a campo que foram feitas nas parcelas sob cultivo, também foram feitas na parcela de referência. Neste caso, devem ser feitas considerações especiais. A literatura indica que com o maior revolvimento do solo exista maior liberação de CO<sub>2</sub> à atmosfera, pela mineralização mais rápida da matéria orgânica, portanto, deveria se esperar um nível de atividade mais baixo ainda do que em plantio direto. Por outro lado, existe uma grande quantidade de material orgânico mineralizável (Figura 9) que é, potencialmente decomponível, variando sua taxa principalmente com as variações de temperatura próprias do local. Na Figura 10 é possível observar o maior nível atingido pela atividade respiratória no campo na pastagem, quando comparado com os sistemas cultivados, qualquer que seja o momento em que foi medida. Estes dados não devem ser interpretados como indicadores de que a pastagem possua uma menor capacidade de seqüestro de carbono, nem que a liberação de CO<sub>2</sub> seja maior, em termos relativos. Para tal deveriam-se obter outras informações como a biomassa microbiana e o quociente metabólico qCO<sub>2</sub>.



**Figura 10:** Atividade respiratória medida no campo, dos solos cultivados e da parcela de referência.

As densidades de solo médias nas parcelas testemunha foram de  $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$  para a camada dos 5 cm superficiais;  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  para a camada de 5 até 10 cm e  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$  entre os 10 e 20 cm. Com estes dados a massa total de solo, até 20 cm é de  $2.545 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Esse valor ultrapassa em 91 Mg a massa de  $2.454 \text{ Mg ha}^{-1}$  estabelecida como referência no solo sob o preparo reduzido. Assim, o estoque de carbono para uma massa de  $2.454 \text{ Mg}$  será igual a  $38,61 \text{ Mg ha}^{-1}$  o que é bem maior do que o estoque presente nos sistemas cultivados.

#### 4.7. Confeção do Balanço de Carbono.

Usando alguns dos dados obtidos até agora, é possível obter uma aproximação de um balanço de carbono para cada um dos sistemas cultivados. O balanço obtido não pode-se considerar como absoluto, já que estava fora das possibilidades materiais, fazer a quantificação de algumas entradas e saídas de carbono do sistema.

Mesmo assim, os dados obtidos terão validade num sentido comparativo, já que as condições dos experimentos, permitem supor que aquelas entradas ou saídas de C do sistema que não foram medidas são muito parecidas, ou desprezíveis ou ambos.

Nas parcelas cultivadas, considera-se que a quantidade de raízes, embora importante, não apresentará diferenças relevantes, já que os rendimentos em grão e em matéria seca de planta total, foram muito próximos uns dos outros, assim como também, a partição da matéria seca entre os distintos órgãos vegetativos. A possível emissão de outros gases que contém C como o metano não foi determinada, mas é de esperar que os valores de cada uma das parcelas sob cultivo sejam semelhantes, além de muito baixos, já que os solos agrícolas que se mantêm por períodos longos em condições aeróbicas, não emitem quantidades relevantes deste gás (CONTI, 2000).

Sendo assim, os resultados terão validade principalmente na comparação do potencial de sequestro de carbono ou de manutenção dos níveis de carbono no solo, e de emissão de  $\text{CO}_2$  à atmosfera, entre os dois sistemas de preparo de solo analisados. Devido à estreita relação entre o C e o N orgânico do solo, a manutenção do estoque de



C e, por conseguinte, da matéria orgânica do solo é fortemente dependente das reservas de N do solo (URQUIAGA et al., 2002). Por isso, estes autores dizem que qualquer sistema de produção agrícola onde o balanço de N seja negativo, indiretamente se estará promovendo a mineralização da matéria orgânica do solo, o que significará também perdas de C orgânico na forma de CO<sub>2</sub>, tudo isto afetado pelo sistema de preparo do solo.

Na região do Pampa, têm sido feitas muitas medições de carbono, uma quantidade um pouco menor de trabalhos descrevem outras frações deste elemento no solo (em geral frações mais lábeis), alguns que mediram respiração, seja em laboratório, seja no campo, mas são muito poucos os que fizeram todas as medições e tentaram fazer um balanço. Um dos mais completos foi o que calculou ALVAREZ (1999) sob cultura de trigo-soja, concluindo que além do sistema de preparo do solo ou fertilização usada existia uma perda de carbono no solo de 1 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Os dados do balanço de carbono são apresentados na Figura 11. Segundo o estoque de carbono no solo poderia se dizer que, nas condições do experimento o plantio direto tem uma vantagem sobre o preparo reduzido de pouco mais de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup>. Estes dados são contrastantes com os apresentados por ALVAREZ et al. (1998) para Pergamino, norte do Pampa Argentino. Ele informa que tanto o sistema de preparo convencional como o plantio direto apresentam perdas de C, mas estas são muito maiores em plantio direto. É preciso ter em conta que mesmo que exista uma maior liberação de CO<sub>2</sub> no campo em plantio direto, o que pode acontecer se houver uma grande quantidade de material facilmente decomponível, a quantidade de palha deixada no solo pode produzir também maior quantidade de matéria orgânica estável por meio da humificação (CONTI, 2000), e aumentar assim o estoque de carbono no solo. Dessa maneira, esse balanço poderia compensar, e até, ser favorável para a captação de C, como carbono orgânico no solo.

Num outro trabalho, ALVAREZ et al. (1995a) encontraram que os dois sistemas de preparo estudados (preparo com aiveca e plantio direto) tinham um balanço negativo de C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, porém no plantio direto foi menor a perda (4 t de C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) do que no preparo convencional (4,8 t C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)

Quanto a concordância entre os níveis de C pertencentes ao estoque do solo na amostragem final e na inicial, no sistema de preparo reduzido, os 28.660 kg ha<sup>-1</sup> de C no solo deveriam-se transformar em 27.150, ou seja, haveria uma perda de 1.510 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja uma taxa de mineralização de C de 5,26 %, o que é muito alta, principalmente para uma região temperada. No caso do plantio direto essa taxa seria de 9,3%, mais alta ainda.

É possível explicar essas taxas de duas formas. Em primeiro lugar, não estamos subtraindo a taxa de C liberado como CO<sub>2</sub> entre o momento de pós-colheita e pré-plantio. Uma estimativa desta quantidade, baseada nos dados obtidos, resulta em torno de 558,15 e 383,05 kg ha<sup>-1</sup> de carbono para preparo reduzido e plantio direto, respectivamente. E essas quantidades correspondem a taxas de mineralização da ordem de 1,84% e 1,26 % para preparo reduzido e plantio direto, respectivamente, que são valores normais para a região no período invernal e explicam também o balanço de carbono mais favorável em plantio direto do que em preparo reduzido.

ANDRIULO et al. (1999a), trabalhando também em Arguidols do Pampa dizem que a natureza dos resíduos teve maior efeito do que sua quantidade na manutenção dos níveis de matéria orgânica no solo, enquanto que as leguminosas perenes misturadas com gramíneas tropicais permitem nessas regiões manter e até acrescentar os níveis de matéria orgânica no solo devido à riqueza que possuem em ligninas e polifenóis. A outra razão seria por assumir que tudo o que se acrescentava na quantidade de resíduos

vegetais adicionados ao solo era mineralizado, como se o sistema estivesse em equilíbrio. Com as taxas calculadas baseadas na estimativa de respiração pode-se notar que os sistemas são dinâmicos e se comportam de maneira diferente segundo o preparo do solo que seja feito.

Para comparar com dados de ganhos de C obtidos em outros sistemas de regiões temperadas, REICOSKY et al. (1995) informaram uma taxa de ganho de até 1,15 Mg ha<sup>-1</sup>, com os valores mais altos relacionados às regiões mais frias ou que receberam expressivos aportes de resíduos de culturas de inverno.

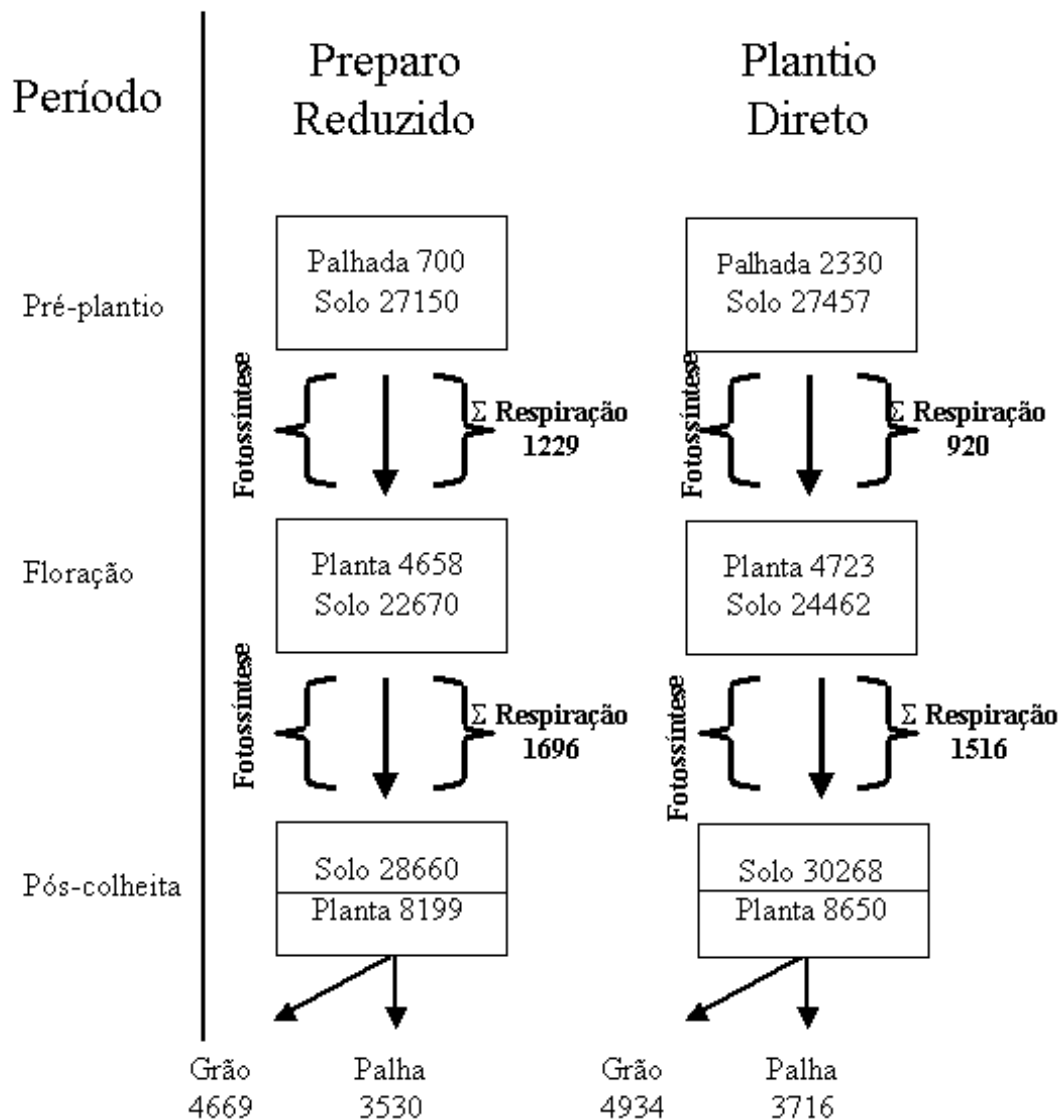
O solo é em última análise, um dreno de carbono, pois o CO<sub>2</sub> fixado via fotossíntese pode ser estocado no solo e em organismos, ou em seus resíduos que podem resistir mais fortemente à biodegradação (DE-POLLI & PIMENTEL, 2002). O uso efetivo da matéria orgânica, através de esterco orgânico e outros produtos similares é importante por aumentar o conteúdo de carbono orgânico do solo, melhorando a qualidade deste, aumentando a produção de biomassa e reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> (LAL et al., 1998).

De maneira geral, para cada tipo de solo, em cada tipo de sistema de produção existe um determinado nível de equilíbrio a atingir (MORON, 1996) quando o sistema estiver estabilizado. Segundo ALVAREZ (1999) um sistema que passa de preparo convencional com arado de aiveca para plantio direto demora uns 10 anos para atingir o equilíbrio, e uma vez nele pode ter um ganho de 4-5 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono. COLE et al. (1987) citado por MORON et al., (1996) discutem este conceito. O balanço de carbono é a diferença entre as entradas (resíduos da cultura, raízes e exudatos radiculares) e as saídas (erosão, mineralização e produtos que se exportam do local). Neste trabalho não foram contabilizadas as raízes (os exudatos radiculares fazem parte do estoque de carbono do solo) e a erosão, mas nas parcelas onde se desenvolveu o experimento a erosão não é um problema relevante, o que não é possível generalizar de maneira nenhuma para todos os solos da região, mesmo pertencendo à Série Marcos Juárez.

Menos ainda, os resultados podem ser aplicados para qualquer região. MORON & BAETHGEN (1994) num estudo feito em Uruguai, indicam que a temperatura apresenta um importante efeito na taxa diária de mineralização, explicando 55% das variações nas médias diárias dos valores de mineralização das parcelas estudadas, seja no inverno ou na primavera.

Em função da experiência acumulada, sobre o comportamento do solo nos diferentes sistemas de produção de grãos, pode-se dizer que no final, o manejo dado ao solo (preparo do solo e rotação de culturas) é o fator determinante no estoque ou seqüestro de C orgânico no solo (URQUIAGA et al., 2002).

Neste trabalho, o balanço de carbono no solo apresentou uma diferença favorável para o plantio direto, após 9 anos de implantação de aproximadamente 1,6 Mg de C, medidas ao final do ciclo da cultura de milho.



**Figura 11:** Dados do estoque de carbono em solo, planta e serrapilheira no ciclo da cultura milho. Os números representam kg de C ha<sup>-1</sup>.

#### 4.8. Estoques de Carbono em Solos sob Monocultura e Rotações, e Principais Origens desse Elemento.

A transformação de resíduos de plantas em matéria orgânica do solo está associada com um enriquecimento muito pequeno em <sup>13</sup>C, que normalmente está na faixa de 0,5 a 1,5‰ (unidades  $\delta$ ) (BALESDENT et al., 1988).

Para testar a segunda hipótese desta tese tiraram-se amostras em dois experimentos da Estação Experimental do INTA, Marcos Juárez. Além destes, foram obtidas amostras de três parcelas de referência, com tempo de antiguidade das pastagens.

O carbono orgânico total, quando tomados todos os tratamentos e todas as profundidades em conjunto, apresentou na análise de variância diferenças estatísticas significativas para as fontes de variação ‘parcela’ e ‘profundidade’.

Os solos sob cultivo apresentam menor conteúdo superficial de carbono que aqueles sob pastagem (Tabela 14), tendo validade tanto para a camada de 0-5 cm como para a de 5-10 cm. Lembrando que as duas parcelas cultivadas (rotação milho – trigo/soja – soja e monocultura de milho) foram feitas com plantio direto. Ou seja, sob qualquer rotação estudada existe uma diminuição do teor de carbono orgânico no solo, se comparado com uma pastagem, mesmo com aquela de 10 anos de implantação (a de menor período sem cultivo das três que são usadas como referência).

**Tabela 14:** Conteúdo de carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para cada uma das cinco parcelas estudadas nas 7 profundidades amostradas.

| Prof. (cm) | Rotação           | Monocultura       | 10 anos           | 30 anos           | 100 anos          |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0-5        | 14,5 a $\pm$ 4,9  | 14,3 a $\pm$ 3,5  | 24,7 b $\pm$ 6,2  | 42,1 c $\pm$ 8,3  | 30,0 b $\pm$ 2,1  |
| 5-10       | 13,8 a $\pm$ 2,6  | 11,8 a $\pm$ 2,3  | 16,0 ab $\pm$ 2,3 | 24,0 c $\pm$ 5,0  | 20,9 bc $\pm$ 1,1 |
| 10-20      | 11,6 ns $\pm$ 2,1 | 11,8 ns $\pm$ 1,6 | 16,3 ns $\pm$ 5,8 | 16,1 ns $\pm$ 2,7 | 18,8 ns $\pm$ 4,7 |
| 20-30      | 6,5 ab $\pm$ 2,4  | 5,8 a $\pm$ 2,4   | 12,6 bc $\pm$ 3,7 | 12,4 bc $\pm$ 4,1 | 14,1 c $\pm$ 3,9  |
| 30-50      | 5,5 ns $\pm$ 2,0  | 6,1 ns $\pm$ 1,8  | 5,5 ns $\pm$ 2,1  | 5,8 ns $\pm$ 1,6  | 7,7 ns $\pm$ 1,4  |
| 50-70      | 3,7 ns $\pm$ 2,8  | 2,8 ns $\pm$ 1,3  | 3,9 ns $\pm$ 0,7  | 3,7 ns $\pm$ 0,8  | 4,4 ns $\pm$ 1,3  |
| 70-90      | 2,3ns $\pm$ 2,0   | 4,0 ns $\pm$ 1,7  | 2,9 ns $\pm$ 1,1  | 3,3 ns $\pm$ 0,8  | 3,7 ns $\pm$ 1,2  |

Valores seguidos pela mesma letra não são significativamente diferentes dentro de uma mesma camada de solo (teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). ns- indica que não houve diferença significativa.

De modo geral, pode-se afirmar que nos tratamentos a distribuição dos teores de carbono orgânico total foi semelhante ao observado por SISTI (2001) trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, Brasil.

Quanto ao cálculo de estoque de carbono, hoje no Pampa Argentino, é praticamente impossível achar um solo em condições totalmente naturais, já que mesmo quando se acha alguma terra sem cultivar, sua composição florística tem mudado em relação à original. Em nosso caso vamos usar o solo chamado de ‘Parcela de Referência 100 anos’, que segundo pesquisadores do INTA há mais de 100 anos que não é cultivado. O local fica ao lado de uma ferrovia o que gerou alguma mudança em sua composição florística, devido às sementes que caem dos vagões dos trens de carga (incluindo muitas de ervas daninhas, tipicamente distribuídas junto às ferrovias no Pampa inteiro).

Assim, com os dados de teores de carbono orgânico e as densidades pode-se obter o estoque em  $\text{kg ha}^{-1}$  de carbono no solo. No entanto, por causa do cultivo o solo vai mudando sua densidade, se adensando, com respeito dos solos mantidos em condições ‘quase’ naturais. Por isso, a adoção de uma profundidade fixa para todos os tratamentos provocaria uma superestimação dos estoques de carbono naqueles tratamentos com maior densidade do solo (neste estudo aqueles que estão sob agricultura), que possuem mais massa de solo para uma mesma unidade de volume.

As pastagens de 10 e 30 anos (chamadas de Parcelas de Referência 10 anos e 30 anos, respectivamente) apresentaram densidades do solo que na prática consideraram-se como iguais, o que já não ocorreu com a pastagem de 100 anos (Parcela de Referência 100 anos), que apresentou valores de densidade variáveis, mas que, no conjunto, teve a

menor quantidade de massa de solo nos 90 cm e por isso foi escolhida como principal referencial.

Na Tabela 15 se apresenta o estoque de carbono em Mg ha<sup>-1</sup> para cada profundidade, independente da densidade, para depois, com esses dados, obtê-lo por unidade de massa. As quantidades de carbono orgânico expressas por volume da solo são apresentadas na última linha.

**Tabela 15:** Estoque de carbono orgânico (Mg ha<sup>-1</sup>) para cada uma das cinco parcelas estudadas, nas 7 profundidades amostradas e expresso em termos de volume de solo.

| Prof. (cm)   | Rotação   | Monocultura | 10 anos   | 30 anos   | 100 anos  |
|--|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Estoque de C para cada profundidade de solo</b> |           |             |           |           |           |
| 0-5  | 8,219 a   | 8,101 a     | 11,977 ab | 21,172 c  | 15,707 c  |
| 5-10   | 8,826 a   | 7,529 a     | 9,902 ab  | 15,238 c  | 13,084 bc |
| 10-20  | 14,637 ns | 14,837 ns   | 19,008 ns | 18,630 ns | 22,594 ns |
| 20-30  | 8,560 ns  | 7,684 ns    | 14,273 ns | 14,887 ns | 14,364 ns |
| 30-50  | 14,063 ns | 12,949 ns   | 13,458 ns | 14,517 ns | 19,891 ns |
| 50-70  | 8,976 ns  | 6,888 ns    | 9,336 ns  | 8,892 ns  | 10,611 ns |
| 70-90  | 5,460 ns  | 6,557 ns    | 6,503 ns  | 7,459 ns  | 8,293 ns  |
| Somatório  | 68,741 a  | 64,545 a    | 84,457 ab | 100,795 b | 10,4544 b |
| <b>Estoque de C para uma mesma massa de solo</b>   |           |             |           |           |           |
| C (Mg ha <sup>-1</sup> )                           | 62,557 a  | 64,798 a    | 81,675 ab | 96,094 b  | 104,544 b |

Valores seguidos pela mesma letra não são significativamente diferentes dentro de uma mesma linha (teste de Tukey, p<0,05). ns- indica que não houve diferença significativa.

Deve-se notar que mesmo que não sejam estatisticamente significativas, as diferenças entre as camadas 10-20 cm, 20-30 e 30-50 (principalmente) são importantes quanto a quantidade de carbono. O somatório do carbono (estoque) na camada de 0-90 cm de profundidade, independentemente do valor de massa de solo, mostra que os solos cultivados apresentam, até essa profundidade, os menores conteúdos de C e as pastagens mais antigas os maiores.

Fazendo a comparação para uma mesma massa de solo, achamos as quantidades de carbono orgânico que se apresentam na Tabela 15.

Estes dados, mesmo sem apresentarem maiores diferenças estatísticas com as já mostradas, permitem ver uma ampliação da diferença entre os solos sob cultivo e sob pastagem, quando considerado por unidade de massa e não de volume.

O tratamento sob cultivo que inclui maior diversificação de culturas não apresentou diferenças significativas na quantidade de carbono acumulada nos 90 cm superficiais e na comparação em igualdade de massa (Tabela 15). Não existem dúvidas que, mesmo que se possa promover um acúmulo de matéria orgânica, com respeito de outros sistemas de preparo (DERPSCH, 2000), o plantio direto não acumula carbono no solo na maneira em que é feito por exemplo pelas pastagens, nem sequer consegue mantê-lo, pelo menos nestas condições, ao contrário do citado por PEREIRA (2001).

DICK et al. (1991) encontraram efeitos positivos e negativos sobre as acumulações de C em solos sob diferentes usos, que foram dependentes da condição de solo avaliado, o que significa que é necessário ter cautela quanto à generalização destes resultados para qualquer ambiente .

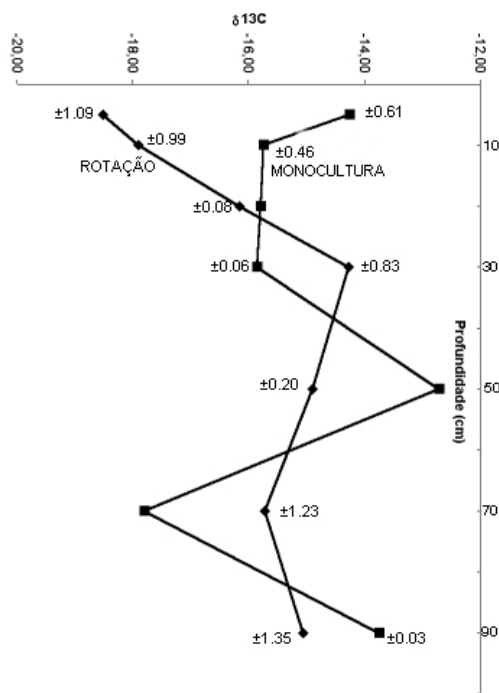
Quanto a origem do carbono, a distribuição da abundância natural do  $\delta^{13}\text{C}$  para os tratamentos de cultivo e testemunhas, pode ser observada nas Figuras 12 e 13 respectivamente. Entre as parcelas sob cultivo houve valores mais altos (menos negativos) na parcela sob monocultura do que naquela sob rotação. Deve-se lembrar que a monocultura que está sendo feita no local é milho, uma planta com metabolismo C4. A rotação apresentou valores mais parecidos às parcelas de referência do que a outra parcela cultivada. Existe em geral uma tendência ao  $\delta^{13}\text{C}$  ser menos negativo com a profundidade. Na parcela sob rotação os valores são um pouco mais negativos na camada superficial, provavelmente devido a que ela vem de uma cultura dupla trigo/soja, e no ano anterior de soja, as duas plantas com metabolismo C3.

As parcelas de referência apresentaram tendências similares, embora a pastagem de 30 anos apresente os valores mais negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 13). De forma discordante, a análise da grama que é cortada no local mas não é retirada apresentou um  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-10,68$ , confirmando o predomínio que observamos no campo de plantas C4 tais como *Cynodon dactylon* e *Paspalum dilatatum*. A explicação para os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nesse solo é o aporte de matéria orgânica proveniente das árvores plantadas nessa parcela (Parque da Estação Experimental).

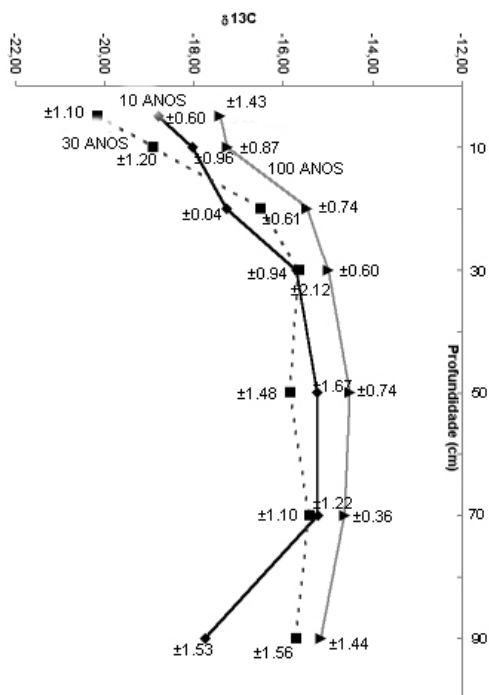
A testemunha de 10 anos mostrou concordância entre os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  obtidos das amostras de solo superficiais e as de vegetal colhido no local, uma pastagem mista de gramíneas e leguminosas, que foi se degradando com o tempo até quase desaparecer a leguminosa. No levantamento de campo observamos um predomínio de gramíneas C3, mesmo que com uma importante presença de *Cynodon plectostachyum* (C4).

A testemunha de 100 anos mostrou no material vegetal colhido um  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,6$ , demonstrando a mistura que existe, com uma maioria de espécies de metabolismo C3 mas com uma relevante presença de algumas plantas C4, como uma espécie de *Eragrostis* sp. nativa e uma boa quantidade de *Sorghum halepensis*, que é comum ao longo das ferrovias que transportam (ou transportavam, já em muitos casos) os grãos para os principais portos de saída de produtos agropecuários.

Os valores em profundidade, em todos os casos, são semelhantes, e em alguns casos até maiores, do que aqueles obtidos por SISTI (2001) no Rio Grande do Sul (Brasil). Esse carbono sub-superficial parece ter uma origem principalmente de plantas C4.



**Figura 12:** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para os tratamentos cultivados (monocultura de milho e rotação) de 0 até 90 cm de profundidade.



**Figura 13:** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para os tratamentos testemunha (10, 30 e 100 anos) de 0 até 90 cm de profundidade.

É difícil diferenciar do ponto de vista da abundância natural de  $^{13}\text{C}$  uma parcela que seja 'referencial' já que mesmo que as pastagens naturais do Pampa sejam principalmente compostas por gramíneas C3, houve uma grande adaptação de algumas plantas C4, que em alguns casos tornaram-se ervas invasoras na agricultura. O mais notável neste solo, com o  $^{13}\text{C}$  usado como marcador natural, é o maior valor que se apresenta onde existe um aporte grande e contínuo de material proveniente de milho (C4).

Antes de acontecerem as grandes mudanças na composição florística do Pampa devido à agricultura, HAUMAN (1928) relata que a composição clímax da vegetação original do Pampa era, aproximadamente, composta por 50% de *Stipa* (C3), 40% de *Bothriocloa* (C4) e 10% de *Paspalum* (C4). Isto representa uma composição isotópica  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20,6\%$ . O valor citado por ANDRIULO et al. (1999a) está em concordância com os valores para a camada superficial encontrados neste trabalho. O autor observou para o horizonte A dos solos de Pergamino, Província de Buenos Aires (Argiúdols típicos, com mais argila e menos silte do que a Série Marcos Juárez), um  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-19,6\%$ .

Um experimento de longo prazo localizado em Missouri, Estados Unidos permitiu a BALESIDENT et al. (1987) estudar a ciclagem da matéria orgânica no solo. Os registros históricos indicavam que a área era originalmente uma pastagem natural com predomínio de espécies C4. Poderiam-se estudar então, as transformações da matéria orgânica que acompanham o cultivo de plantas C3 tais como trigo (*Triticum aestivum*) ou trevo vermelho (*Trifolium pratense*). Os autores colheram amostras representando uma seqüência temporal. Existem ainda estudos ao inverso, com o cultivo de plantas C4 em pastagens originais com predomínio de C3, onde pode-se visualizar a mudança na composição isotópica do carbono orgânico do solo (BALESIDENT et al., 1988).

No Pampa, a pastagem original é composta por uma população mista de plantas C3 e C4. Assim, o solo apresenta uma composição isotópica intermédia com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre  $-18$  e  $-21$  em função da latitude (ANDRIULO et al., 1999a). Segundo estes autores esse estado inicial tem a vantagem, na teoria pelo menos, de ser capaz de detectar tanto uma declinação do  $\delta^{13}\text{C}$  seguindo a introdução de uma planta C3, como um acréscimo do  $\delta^{13}\text{C}$  se uma planta C4 for introduzida.

Neste estudo, a percentagem de carbono de resíduos de plantas C3 em monocultura é de 41,51%. Já na parcela sob rotação a composição isotópica do carbono não apresenta diferenças de importância em relação à parcela que foi tomada como padrão. A quantidade de carbono aportado pela monocultura de milho foi de 36,93 Mg ha<sup>-1</sup>. BALESIDENT et al., (1990) observaram que onde a monocultura foi mantida por muitos anos, após vários anos de retirada da vegetação original, as culturas determinaram uma degradação estável da matéria orgânica original do solo. BALESIDENT et al. (1990) encontraram que em condições de clima temperado, em um Hapludalf, a monocultura de milho preservou maior quantidade da matéria orgânica original do solo, procedente de C3. Mas em nosso caso, o material original difere, no que se refere à sua marcação natural, do que poderia ser um que vem de material orgânico com esse tipo de metabolismo.

Mesmo que ANDRIULO et al. (1999a) tenham dito que a composição do  $\delta^{13}\text{C}$  da pastagem com mistura de C4 e C3 pode ser ideal para detectar acréscimos ou decréscimos deste elemento, ele utilizou no seu ensaio rotações (ou monoculturas) que continham somente plantas de um dos metabolismos, e dessa forma conseguia distinguir todas as frações novas de carbono das velhas. Neste estudo, os dois tratamentos cultivados possuem milho (C4) mas a rotação inclui uma mistura C3 e C4 que não



marca uma diferença notável com a parcela de referência. Mesmo apresentando inconvenientes desta natureza, o uso da abundância natural de  $^{13}\text{C}$  é uma metodologia adequada para estudar as reservas de carbono em solos sob diferentes seqüências de cultivo.

## 5. CONCLUSÕES

- Os sistemas de preparo de solo não resultaram em diferenças significativas no conteúdo de carbono orgânico total, nos 20 cm superficiais do solo, ainda que exista uma tendência ao maior acúmulo no sistema de plantio direto, quando comparado com o preparo reduzido.
- As emissões líquidas de CO<sub>2</sub> foram menores no sistema de plantio direto, porém essa redução não foi suficiente para se refletir no estoque de carbono.
- Na comparação de rotações (monocultura de milho vs. rotação milho – trigo/soja – soja), sob plantio direto, não foram observadas diferenças significativas no estoque de carbono até 90 cm de profundidade.
- As áreas de pastagem apresentaram um estoque de carbono maior na camada de 0-90 cm do que os tratamentos sob cultivo.
- A cultura de milho, na monocultura, representou um importante aporte à matéria orgânica do solo, quando comparada com as áreas usadas como parcelas de referência.
- A comparação através do  $\delta^{13}\text{C}$  inicial das parcelas de referência não permitiu avaliar o que aconteceu com o carbono de origem do solo na parcela sob rotação, devido a que esta rotação também é constituída por uma mistura de plantas C3 e C4.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A primeira hipótese deste trabalho de tese refere-se a ‘um maior potencial conservacionista’ já que, no fundo, os dois sistemas de preparo de solo usados nasceram como uma alternativa mais conservacionista à aração convencional. Hoje, na região de Marcos Juárez o sistema que nos chamamos nesta tese de preparo reduzido é o que causa maior revolvimento do solo dentre os que são usados na agricultura.

Então, a mudança dos produtores para o sistema de plantio direto, foi se dando com uma mistura conjunta de bons resultados, no nível imediato e em prazos mais longos. É difícil impor, principalmente num país que devido às contínuas crises possui uma alta instabilidade econômica, uma prática nova se esta não apresenta resultados imediatos. Mesmo que no início houvesse uma tendência a menores rendimentos para o plantio direto, se comparados com os preparos tradicionais, devido principalmente à mineralização de matéria orgânica do solo, hoje a diferença é quase compensada. O que foi comprovado nos resultados de matéria seca total e principalmente de grão, este último buscado pelo produtor. Destaca-se como uma das grandes vantagens dos experimentos utilizados, o seu tamanho, que reproduz condições aproximadas àquelas de uma área em produção, e também que as práticas de adubação, controle de pragas etc., não diferem do que o produtor tem condições (técnicas e econômicas) de fazer em sua lavoura.

Assim, com um rendimento pelo menos igual, a adoção do plantio direto foi facilitada na região. Logo começam-se atingir outras vantagens para o produtor, como menor uso de combustíveis, controle da erosão, melhor aproveitamento da água etc., como descrevem para a mesma região onde este trabalho foi feito MARELLI & ARCE (1995). Neste estudo, apesar de não ter sido estatisticamente significativo, houve um aumento no teor de carbono orgânico total do solo, que poderá, talvez, se acrescentar e se diferenciar estatisticamente no futuro. Por enquanto, trabalhos anteriores (COSTANTINI et al., 1996), nos mesmos solos, mostravam que frações mais lábeis como biomassa-C tinham muito mais sensibilidade aos sistemas de preparo usados.

Assim, nesse estudo preferiu-se avançar na tarefa de determinação de um balanço de carbono. Mesmo assim, caracterizou-se uma fração lábil, o carbono potencialmente mineralizável, encontrando-se uma forte influência do momento de amostragem, possivelmente, como já foi dito, devido à atividade da rizodeposição. É também relevante que o plantio direto diminuiu a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera em todos os momentos de amostragem e o estoque de carbono foi ligeiramente maior, ainda que não de maneira estatisticamente significativa.

Como já foi dito, não é possível fazer uma quantificação absoluta do balanço de carbono, devido, entre outras coisas, que não foram determinados órgãos das plantas como as raízes, que fazem um grande acúmulo de carbono. De qualquer maneira, o balanço é relevante com fins comparativos e podemos dizer que mesmo que não exista uma diferença na quantidade total de carbono orgânico no solo, mas existe uma menor perda de C gasoso para a atmosfera devida a respiração, além de uma distribuição diferente da matéria orgânica nos solos, fato que já tinha sido demonstrado por COSTANTINI et al. (1996).

Na segunda parte do trabalho, e já verificando a segunda hipótese, trabalhou-se com parcelas cultivadas sob plantio direto, sendo a diferença entre elas a rotação de culturas. O estoque de carbono orgânico não apresentou diferenças entre os tratamentos cultivados. A rotação usada não condicionou a quantidade de matéria orgânica. As

análises de  $\delta^{13}\text{C}$  mostraram que a monocultura de milho fez um aporte importante à matéria orgânica presente nesse solo. As rotações escolhidas não foram as melhores para detectar mudanças na composição da matéria orgânica e as percentagens de matéria orgânica nova e velha. No caso da rotação, esta mistura de plantas C3 e C4, semelhante à vegetação tomada como testemunha tem marcação natural parecida.

ANDRIULO et al., (1999 a) indicam essa marcação natural das pastagens do Pampa como uma vantagem para conhecer a origem da matéria orgânica do solo, já que possuem um valor intermédio, típico da mistura de plantas C3 e C4. Desde que sejam usadas para comparação rotações com 100% de plantas C3 ou 100% de plantas C4.

A espécie não condicionou o estoque de carbono, embora sim a procedência dele no solo, pelo menos foi o que se observou na monocultura de milho.

Para falar em seqüestro de carbono deveriam ter sido analisados os conteúdos de nitrogênio no solo e os aportes feitos pelos materiais vegetais colocados nele. O carbono do solo é parte do capital dos países subdesenvolvidos, mas é parte também de toda a comunidade internacional (IZAC, 1997). Portanto, os interesses dos agricultores pobres ou em processo de empobrecimento, tal o caso do pequeno produtor argentino, e os da comunidade internacional estão em conflito. Por isso, práticas que são ótimas do ponto de vista do produtor podem não o serem em uma perspectiva regional.

Muitas práticas de manejo sustentável de solos precisam investimentos que oferecem benefícios ao agricultor somente após quatro ou seis anos (IZAC, 1997). Isso não é possível de se empreender por um produtor pobre ou por um que, mesmo não atingindo esse nível de pobreza, ache um risco muito grande em fazer um investimento no momento de uma economia com grande instabilidade. Portanto, os agricultores nessas condições, mesmo que bem informados, não adotarão de maneira voluntária níveis de práticas de conservação socialmente ótimos.

No seu trabalho, embora escrito para as regiões tropicais mas que pode ser de amplo uso, IZAC (1997) escreve que deve existir uma compensação dos países industrializados para com os agricultores pobres, quando estes adotarem práticas de conservação do carbono do solo.

As necessidades de pesquisa não podem ser vistas isoladamente do contexto ambiental e, principalmente social, não existindo 'receitas' de aplicação universal. IZAC (1997) relata que, a criação de equipes interdisciplinares de cientistas de solos, biólogos e profissionais das ciências sociais, é o desafio a ser vencido para atender os problemas destes produtores, e que este desafio para a comunidade científica é maior ainda do que o cumprimento da agenda de pesquisas já estabelecida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, R; SANTANATOGLIA, OJ. 1988. Respuesta respiratoria del suelo al agregado de distintas cantidades de carbono asimilable. *Ciencia del Suelo*. Vol. 6. N° 2. 162-164.
- ALVAREZ, R; O.J. SANTANATOGLIA & R. GARCÍA. 1995 a. Soil respiration and carbon inputs from crops in a wheat – soybean rotation under different tillage systems. *Soil Use and Management*, 11:45-50.
- ALVAREZ, R; R. DÍAZ; N. BARBERO; O. SANTANATOGLIA & L. BLOTTA. 1995 b. Soil organic carbon, microbial biomass and CO<sub>2</sub> – C production from three tillage systems. *Soil Tillage Res.* 33:17-28.
- ALVAREZ, R; O.J. SANTANATOGLIA & R. GARCIA. 1996. Plant and microbial contribution to soil respiration under zero and disk tillage. *Eur. J. Soil. Biol.* 32:173-177
- ALVAREZ, R; M.E. RUSSO; P. PRYSTUPA; J.D. SCHEINER & L. BLOTTA. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90: 138-143
- ALVAREZ, R. 1999. Balance de carbono en suelos cultivados de la Pampa Húmeda. En: Jornada técnica “Biología del suelo en siembra directa” INTA – PROCISUR. Octubre de 1999. Buenos Aires. Boletín Especial de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. R. Alvarez (Ed). pag. 33-36
- ANDERSON T-H & K.H. DOMSCH. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 471-479.
- ANDRIULO, A; J. GUÉRIF & B. MARY. 1999. Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural <sup>13</sup>C abundance. *Agronomie.* 19: 349-364
- ANDRIULO, A; B. MARY & J. GUERIF. 1999 a. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19: 365-377.
- ANGERS D A, A. PESANT & J. VIGNEUX. 1992. Early cropping - induced changes in soil aggregation, organic matter and microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:115-119.
- BAETHGEN, W & D. MARTINO. 2000. Emisiones de Efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el Mercado de Carbono. INIA, La Estanzuela. Em: <http://www.inia.org.uy>
- BALESDENT, J; A. MARIOTTI & B. GUILLET. 1987. Natural <sup>13</sup>C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 19:25-30
- BALESDENT, J; G.H. WAGNER, & A. MARIOTTI. 1988. Soil organic matter turnover in long – term field experiments as revealed by Carbon – 13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:118-124.
- BALESDENT, J.; A. MARIOTTI & D. BOIGONTIER. 1990. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from <sup>13</sup>C abundance in maize fields. *Journal of Soil Science*, 41:587-596.

- BATJES, N.H. 1998. Mitigation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations by increased carbon sequestration in soil. *Biol. Fertil. Soils* 27:230-235.
- BAUER, A & A.L. BLACK. 1994. Quantification of the effects of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 185-193.
- BEARE, M.H; M.L. CABRERA; P.F HENDRIX & D.C. COLEMAN. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:787-795.
- BENDER, M.M. 1968. Mass spectrometric studies of carbon 13 radiations in corn and other grasses. *Radiocarbon* 10:468-472.
- BREMER, E; H.H. JANZEN & A.M. JOHNSON. 1994. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.* 74: 131-138.
- BUYANOVSKY, G.A & G.H. WAGNER. 1998. Changing role of cultivated land in the global carbon cycle. *Biol. Fertil. Soils.* 27:242-245.
- CARTER M R. 1991. The influence of tillage on the proportion of organic carbon and nitrogen in the microbial biomass of medium-textured soils in an humid climate. *Biol. Fertil. Soils*, 11: 135-139.
- CONTI, M; N. ARRIGO & H. MARELLI. 1997. Relationship of soil carbon light fraction, microbial activity, humic acid production and nitrogen fertilization in the decaying process of corn stubble. *Biol. Fertil. Soils*, 25: 75-78.
- CONTI, M. 2000. *Principios de Edafología... con énfasis en suelos argentinos*. 2da. Edición. Editorial Facultad de Agronomía. Fac. de Agronomía. UBA. 430 pp.
- COSENTINO, D; A. COSTANTINI; A. SEGAT & M. FERTIG. 1998. Relationships between organic carbon fractions and physical properties of an Argentine soil under three tillage systems. *Pesq. agropec. bras.*, Vol. 33: 981-986
- COSENTINO, D.; C. PASCALE & A. COSTANTINI. 2000. *Suelos de la Región Pampeana. Características y principales limitaciones*. CIFA. Facultad de Agronomía. 11 pp.
- COSTANTINI, A; A SEGAT & D. COSENTINO. 1995. The effect of different soil management procedures on carbon cycle components in an Entic Hapludoll. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 26:2761-2767.
- COSTANTINI, A; D. COSENTINO & A SEGAT. 1996. Influence of tillage systems in biological properties of a typic Argiudoll soil under continuous maize in Central Argentina". *Soil & Tillage Research.* 38:265-271.
- COSTANTINI, A; D, COSENTINO; M. FERTIG & M. ALÁ RUÉ. 1999. Dinámica de las fracciones carbonadas en un ciclo de cultivo de maíz bajo tres sistemas de labranza. *Agricultura Técnica (Chile)* 59:45-50.
- COSTANTINI, A; C. GALARZA; H. DE-POLLI; R. PEREYRA ROSSIELLO & R. LAGO. 2002. *Variações no estoque de carbono num solo do Pampa Argentino sob diferentes sistemas de preparo*. Apresentado em Fertbio 2002. Rio de Janeiro. Setembro de 2002
- CRESPO, L; L. PICONE; Y. ANDREOLI & F. GARCIA. 2001. Poblaciones microbianas y contenido de carbono y nitrógeno del suelo en sistemas de siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo*, 19: 30-38.

- DE-POLLI, H. (1999). In situ assessment of C loss from corn extract decomposition in soil by the variation of  $^{13}\text{C}$  at natural abundance. Report (part II). MSU. USA.24 pp.
- DE-POLLI, H & M. S. PIMENTEL. 2002. Indicadores de qualidade do solo. Curso Agrobiologia. EMBRAPA – Agrobiologia. Cap. 11. Julho 2002.
- DERPSCH, R. 2000. Expansão Mundial do Plantio Direto. Rev. Plantio Direto. Ed. Aldeia Norte. nº. 59;p.32-40.
- DIAZ ZORITA, M. 1999. Efectos de seis años de labranzas en un hapludol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. Ciencia del Suelo, 17: 31-36.
- DICK, W.A.; E.L McCOY; W.M EDWARDS & R. LAL. 1991 Continuous application of no-tillage to Ohio Soils. Agronomy Journal 83:65-73.
- ECHEVERRIA, H; R. BERGONZI & J. FERRARI. 1993. Carbono y nitrógeno de la biomasa microbial de suelos del sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo. Vol. 10:1136-41.
- FOLLET, R.F; E.A. PAUL;S.W. LEAVITT;A.D. HALVORSON; D. LYON & G.A. PETERSON. 1997. Carbon isotope ratios of great plains soils and in wheat follow systems. Soil. Sci. Soc. Am. J. 61:1068-1077.
- FRANZLUEBBERS, AJ; F.M. HONS & D.A. ZUBERER. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:460-466
- GHELFI, R; A. BUJÁN; M. QUITEGUI & L. GHELFI. 1984. Determinación de  $\text{N}_2$  atmosférico fijado por soja (*Glicine max L.*) mediante utilización de  $^{15}\text{N}$  en condiciones de campo. Ciencia del Suelo. Vol. 2. N° 1. 45-51.
- GOLCHIN, A; J.M. OADES; J.O SKJEMSTAD & P. CLARKE. 1995. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by  $^{13}\text{C}$  natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. Aust. J. Soil Res. 33: 59-76.
- GUPTA, V V S R & J.J. GERMIDA. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. Soil Biol. Biochem. 20: 777-786.
- HALL, AJ; C.M. REBELLA, C.M. GHERSA & J.P. CULOT. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: Pearson CJ (Ed.) Field crop ecosystems. Elsevier, Amsterdam, pp 413- 450.
- HAUMAN, L. 1928. Les modifications de la Flore Argentine sous l'action de la Civilisation (Essai de Géobotanique humaine) Académie Royale de Belgique. Classe des Sciences. Memoires, Collection 4°, Deuxième série, Tome IX, fasc. 3.
- HAVLIN J L, D.E. KISSELL, L. D. MADDUX, M.M. CLAASEN & J. H. LONG. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 448-452.
- HOLLEMAN, E.A. & D.C. COLEMAN. 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. Ecology. 68: 425-433
- INTA, 1978. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3363-17 Marcos Juárez. INTA. CIRN. 86 pag.

- IZAC, A. 1997. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma*. 79:261-276.
- JASTROW, J.D.; T.W. BOUTTON & R.M. MILLER 1996. Carbon dynamics of aggregate – associated organic matter estimated by carbon – 13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:801-807.
- JENKINSON D S & D.S. POWLSON. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8: 209-213.
- KARLEN, D.L.; E.C. BERRY; T.S. COLVIN & R.S. KANWAR. 1991. Twelve year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in northeast Iowa. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 1985-2003.
- KERN, J.S & M.G. JOHNSON. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 200-210.
- KUDEYAROV, V.N & I.N. KURGANOVA. 1998. Carbon dioxide emissions and net primary production of Russian terrestrial ecosystems. *Biol. Fertil. Soils*. 27:246-250.
- LAL, R; J.M KIMBLE,; R.F. FOLLET & C.V. COLE. 1998. The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Ann Arbor Press. Chelsea. MI. 128 pp.
- MAGID, J; A. GORISSEN & K.E. GILLER. 1996. In search of the elusive “active” fraction of soil organic matter: Three size – density fractionation methods for tracing the fate of homogeneously <sup>14</sup>C labelled plant materials. *Soil. Biol. Biochem.* 28: 89-99.
- MARELLI, H & J. ARCE. 1995. Aportes en Siembra Directa. Enciclopedia Agro de Cuyo, Manuales – 12. CR. Córdoba, EEA Marcos Juárez. INTA. ISSN 0327-3377. 40 pag.
- MARTIN, A; A. MARIOTTI; J. BALESSENT; P. LAVELLE & R. VUATTOUX. 1990. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by <sup>13</sup>C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.* 22:517-523.
- MARTINO, D. 1997. Siembra directa en los sistemas agrícola-ganaderos del litoral. INIA. Uruguay. Serie Técnica 82. Convenio INIA-PRENADER. INIA La Estanzuela. 28 pp.
- MARTINO, D. 2000. Generación de créditos de carbono por cambios en el uso de la tierra. INIA – La Estanzuela. Uruguay. En: <http://www.inia.org.uy>
- MARTINO, D. 2001. Secuestro de carbono atmosférico: un nuevo ingreso para los agricultores del Cono Sur? Em: Siembra directa en el Cono Sur. PROCISUR. Documentos. 55-66.
- MORON, A & W. BAETHGEN. 1994. Mineralización de la materia orgánica del suelo en cuatro sistemas agrícolas. En: *Materia orgánica en la rotación cultivo-pastura*. INIA, Uruguay. INIA La Estanzuela. Serie Técnica N° 41. Marzo de 1994. Pag. 7-9.
- MORON, A. 1996. El rol del carbono en los sistemas productivos agropecuarios. En: *Manejo y Fertilidad de Suelos*. MORON, A; MARTINO, D & SAWCHIK, J (eds.). INIA. Uruguay. INIA La Estanzuela. Serie Técnica 76. pp. 1-7



- MORON, A; D. MARTINO & J. SAWCHIK, J (Eds). 1996. Manejo y Fertilidad de Suelos. INIA. Uruguay. INIA La Estanzuela. Serie Técnica 76. 167 p.
- MOSIER, A.R. 1998. Soil processes and global change. *Biol. Fertil. Soils*. 27:221-229.
- NEILL, C.; J. MELILLO; P.A. STEUDLER; C.C. CERRI; J.F.L. MORAES; M.C. PICCOLO & M. BRITO. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in southwestern Brazilian amazon. *Ecological Applications*. 7: 1216-1225.
- NELSON D W & L.E. SOMMERS. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. Page A L (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy, USA, Agronomy 9*, pp. 539-579.
- NICOLARDOT, B; J.A.E MOLINA & M.R. ALLARD. 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter: model calibration with long-term incubation data. *Soil Biol. Biochem.* 26:235-243.
- PARTON W J, D.S. SCHIMEL, C.V COLE, D.S. OJIMA. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- PAUL, E.A; D. HARRIS; H.P. COLLINS; U. SCHULTHESS & G.P. ROBERTSON. 1999. Evolution of CO<sub>2</sub> and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems. *Applied Soil Ecology*. 11:53-65.
- PEREIRA, M. 2001. O camino sem volta. 9° Congreso Nacional de AAPRESID, Mar del Plata, Argentina. Agosto de 2001. pp. 93-95
- PIDELLO, A; E. PEROTTI; G. CHAPO & L. MENÉNDEZ. 1995. Materia orgánica, actividad microbiana y potencial redox en dos Argiudoles típicos bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 13: 6-10.
- REICOSKY, D; W. KEMPER; G. LANGDALE; C. DOUGLAS jr & P. RASMUSSEN. 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Cons.* 50: 253-261.
- RICE, C. 2001. Secuestro de CO<sub>2</sub> atmosférico en el suelo: Cómo y por qué? 9° Congreso Nacional de AAPRESID. Mar del Plata, Argentina. Agosto de 2001. 71-77.
- RIZZALLI, R; C. NAVARRO & H. ECHEVERRIA. 1984. Efecto del manejo y estación del año sobre la capacidad de mineralización y biomasa total en un Argiudol típico del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. Vol. 2. N° 1. 62-67.
- RICHTER, M; G. MASSEN & I. MIZUNO. 1973. Total carbon and "oxidizable" organic carbon by the Walkley-Black procedure in some soils of the Argentine Pampa. *Agrochimica* 17: 462-472.
- RICHTER D D; L.I. BABBAR; M.A. HUSTON & M. JAEGER. 1990. Effects of annual tillage on organic carbon in a fine - textured udalf: the importance of root dynamics to soil carbon storage. *Soil Sci.* 149: 78-83.
- ROBINSON, C.; R. CRUSE & M. GHAFARZADEH. 1996. Cropping system and nitrogen effects of Mollisol organic carbon. *Soil Science-Society-of-America-Journal*. 1996, 60: 1, 264-269;
- SAUBIDET, M & N. GIAMBIAGI. 1991. Mineralización biológica de nitrógeno y sistemas de labranza. XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas: 14.

- SISTI, C.P.J. 2001. Influência de sistemas de preparo do solo e manejo de culturas sobre o estoque de carbono e nitrogênio do solo em diferentes condições agrícolas. Tese de Mestrado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 231p.
- SMITH, B & S. EPSTEIN. 1971. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiol.* 47: 380-384.
- TORN, M.S; S.E. TRUMBMORE; O.A. CHADWICK; P.M. VITOUSEK & D.M. HENDRICKS. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature.* 389:170-173.
- URQUIAGA, S; C. SISTI; L. ZOTARELLI, B. ALVES & R. BODDEY. 2002. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. Curso Agrobiologia. EMBRAPA – Agrobiologia. Cap. 16. Julho 2002.
- VELDKAMP, E. 1994. Organic carbon turnover in three tropical soil under pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal.* 58:175-180.
- VORONEY, P & E. PAUL. 1984. Detgermination of Kc and kn in situ for calibration of the chloroform fumigation incubation method. *Soil Biol. Biochem* 13: 99-104.
- WARDLE, D.A. 1998. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass. A global-scale synthesis. *Soil Biol. Biochem.* 30:1627-1637.
- ZOURARAKIS, D. 1983. Evolución del contenido de nitratos en un Argiudol bajo cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo.* Vol. 1 N° 1. 53-63.