

ESTUDO

# POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO NO SOLO A PARTIR DA REABILITAÇÃO DE PASTAGENS DEGRADADAS NO CERRADO

# ▶ Índice

## PARTE 1: Guia para avaliação do sequestro de carbono no solo: coleta, preparo, análise e cálculo

Considerações iniciais .....	pg.3
Matéria orgânica e os estoques de carbono do solo .....	pg.8
Abordagens para avaliação das mudanças nos estoques de carbono no solo .....	pg.12
Cálculo dos estoques de carbono do solo .....	pg.18
Coleta de amostras de solo para determinação do estoque de carbono .....	pg.19
Preparo das amostras coletadas .....	pg.24
Determinação do teor de C no solo pelo método “via seca” ou “analisador elementar” .....	pg.25
Determinação da densidade do solo .....	pg.30
Expressão dos resultados dos estoques de C do solo: comparação da mesma massa de solo .....	pg.33
Resolução .....	pg.35
Considerações finais .....	pg.40

## PARTE 2: Estimativa do sequestro de carbono no solo pela reabilitação de pastagens degradadas no cerrado

Considerações iniciais .....	pg.43
Recomendações de amostragem de solo para a estimativa do sequestro de C pela reabilitação de pastagens degradadas .....	pg.46
Determinação do estoque de C: teor de C no solo pelo método “via seca” ou “analisador elementar”, e de densidade do solo via amostragem .....	pg.50
Determinação do estoque de C: utilizando métodos alternativos à “via seca” e de densidade do solo via amostragem .....	pg.53
Comparação do estoque de C no solo a partir dos procedimentos metodológicos padrões e alternativos .....	pg.60
Prós e contras, incerteza, complexidade e custo .....	pg.63
Potenciais de sequestro de carbono no solo pela recuperação de pastagens degradadas no cerrado .....	pg.73
Considerações finais .....	pg.77

# Guia para avaliação do sequestro de carbono no solo: coleta, preparo, análise e cálculo

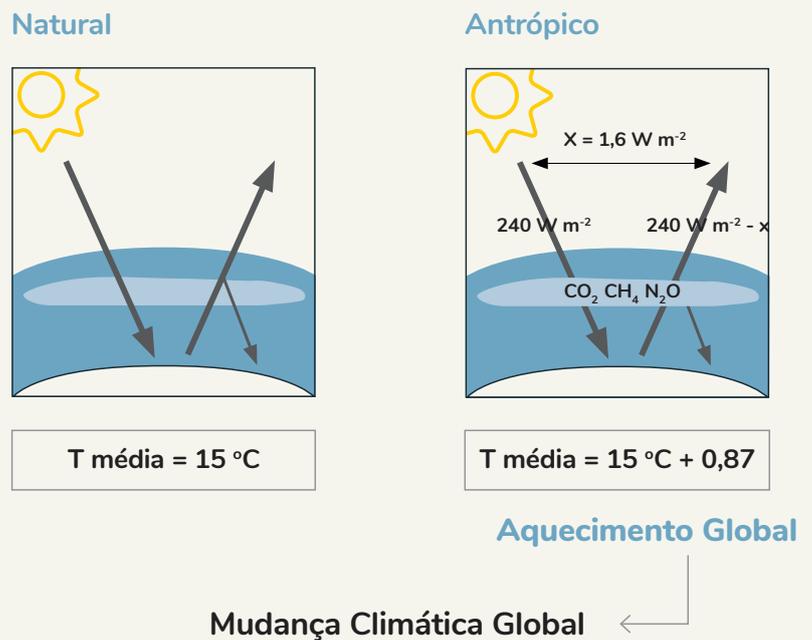
## ► Considerações iniciais

Tem sido crescente a preocupação mundial em relação às mudanças do clima no planeta, decorrentes, principalmente, do excesso de emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases, tais como o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Em princípio, esses gases são responsáveis pela manutenção da temperatura média de 16-18 °C na Terra, promovendo o chamado “efeito estufa”, essencial para a existência da vida no planeta.

Estudos revelam que, nos últimos 200 anos, a concentração desses gases na atmosfera, principalmente de  $\text{CO}_2$ , vem aumentando gradativamente, e de forma mais significativa nas últimas décadas (IPCC, 2019). Uma das principais

consequências é o chamado “aumento do efeito estufa” ou “efeito estufa antrópico”, devido à maior reflexão dos raios infravermelhos para a Terra, promovendo um desequilíbrio energético (*Figura 1*).

**Figura 1.** Representação esquemática do efeito estufa natural e antrópico, e seus impactos em relação à temperatura média da Terra.



De acordo com o mais recente relatório do Painel Intergovernamental para Mudanças do Clima (IPCC em inglês), *Climate Change and Land* (IPCC, 2019), de 1850-1900 a 2006-2015, a temperatura média do ar na superfície da Terra já aumentou 1,53 grau, enquanto a temperatura média global (terra e oceano) aumentou 0,87 °C. Esse aquecimento resultou em um aumento da frequência, intensidade e duração de eventos relacionados ao calor na maioria das regiões terrestres. A frequência e a

intensidade das secas aumentaram em algumas regiões (incluindo o Mediterrâneo, oeste da Ásia, muitas partes da América do Sul, grande parte da África e nordeste da Ásia), e houve um aumento na intensidade de eventos de fortes chuvas em escala global (IPCC, 2019).

O setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) é responsável por pouco menos de 25% (aproximadamente 10 a 12 GtCO<sub>2</sub>eq/ano) das emissões antrópicas globais de gases do efeito estufa (GEE) – as quais são provenientes principalmente do desmatamento e emissões pela pecuária, além do uso de fertilizantes nitrogenados. Entre 2000 e 2010, as emissões anuais de GEE da produção agrícola foram estimadas entre 5,0 e 5,8 GtCO<sub>2</sub>eq/ano, ao passo que o fluxo anual de GEE decorrente de atividades de uso da terra e mudança desse uso foi, aproximadamente, de 4,3 a 5,5 GtCO<sub>2</sub>eq/ano (IPCC, 2014).

No entanto, estima-se que a implementação global de melhores práticas de produção agrícola e pecuária possa fornecer de 20% a 40% da mitigação das emissões de GEE para cumprimento do objetivo do Acordo de Paris, que é de limitar o aquecimento global entre 1,5 °C e 2 °C até o final do próximo século (IPCC, 2019).

Em sua *Contribuição Nacionalmente Determinada* (NDC em inglês) – pacote de compromissos e contribuições dos países para o cumprimento do Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) –, o Brasil se propôs a reduzir suas emissões de GEE em 43% em 2030, com base nos níveis de 2005. A contribuição do setor agropecuário nacional viria pelo fortalecimento do plano de agricultura de baixo carbono, chamado Plano ABC, que promove a introdução de práticas sustentáveis na agricultura (Brasil, 2015).

Essas práticas se concentram na recuperação de pastagens degradadas, adoção do sistema de plantio direto na palha e implementação de integração lavoura-pecuária-floresta em cerca de 20 milhões de hectares. A implementação de tais práticas é capaz de aumentar a eficiência de produção agropecuária e reduzir as emissões de GEE, principalmente pela remoção de parte do carbono atualmente contido na atmosfera, sob a forma de CO<sub>2</sub>, e pela fixação no solo, processo denominado como “sequestro de carbono no solo”.

Todavia, apesar de o Brasil já ter investido mais de 16 bilhões de reais diretamente pelo Plano ABC entre 2010 e 2019, e já contemplar inúmeros produtores que implementaram e conduzem boas práticas de produção em suas propriedades rurais, o país ainda

não consegue comprovar o sequestro de C no solo derivado dessas ações. Um dos maiores entraves é a falta de conhecimento sobre a avaliação dos estoques de C do solo para análise do sequestro de carbono. Como consequência disso, o país não consegue dar transparência à implementação de sua NDC no setor, o que o impede de alavancar financiamentos verdes, dificulta a adesão de novos produtores a práticas mais eficientes e a valorização de seus produtores no mercado nacional e internacional.

Nesse contexto, o presente material tem o objetivo de auxiliar na compreensão dos principais aspectos associados à adequada avaliação dos estoques e sequestro de carbono no solo de sistemas agropecuários, trazendo informações relevantes para tomada de decisão para o monitoramento de políticas públicas, programas e iniciativas de sequestro de carbono no solo.

## ▶ Matéria orgânica e os estoques de carbono do solo

O carbono (C) é um elemento vital, pois, juntamente com o oxigênio (O<sub>2</sub>), forma o CO<sub>2</sub>, participando no processo de fotossíntese, que é o início da cadeia trófica. Dessa forma, o C transita em todas as esferas: atmosfera, biosfera, pedosfera (humosfera), litosfera e hidrosfera. A sua participação se dá tanto na forma de compostos inorgânicos muito simples (CO<sub>2</sub>) até compostos complexos de tecidos vegetais (celulose, lignina) e animais, e ainda em compostos mais condensados, como no caso do húmus, carvão, petróleo, entre outros.

Considerando apenas a atmosfera e os ecossistemas terrestres, as estimativas elaboradas pelo IPCC evidenciam que há aproximadamente 730-750 PgC na atmosfera (sendo 1 Pg = 10<sup>15</sup> g ou 1 bilhão de t de C), 470-655 PgC na vegetação e 1.500-2.000 PgC no solo, a um metro de profundidade (cerca de 800 Pg C estão armazenados somente nos primeiros 30 cm de profundidade). Esses valores indicam que existe, de duas a três vezes, mais carbono nos solos (na forma de matéria orgânica) do que o armazenado na vegetação, e cerca do dobro em comparação com a atmosfera (**Figura 2**).

**Figura 2.**  
Estoques globais  
de carbono nos  
ecossistemas  
terrestres.

		Pg
	Atmosfera	730
	Vegetação	470 - 655
	Solo (0 - 30 cm)	≈ 800
	Solo (1 m)	1500 - 2000

Valores em GT de C (1GT = 10<sup>9</sup>t = 1 Pg)

Na pedosfera, o C está sob as formas orgânicas e inorgânicas. A forma orgânica está relacionada aos constituintes da matéria orgânica do solo (MOS), sendo que as substâncias húmicas são os componentes mais abundantes, mas também está presente nos organismos e seus metabólitos, restos vegetais e animais em vários estágios de decomposição. O carbono na forma mineral pode se apresentar sob a forma de minerais carbonatados em diversas fases de alteração, bem como insumos e resíduos normalmente aplicados na agricultura, como o calcário.

Reconhecidamente, o solo é composto por quatro componentes principais: ar, água, matéria mineral e MOS. A fonte principal de MOS são os restos vegetais e animais que são depositados na superfície do solo, como também os produtos da exsudação do sistema radicular

ou ele próprio, quando em estágio de decomposição. A entrada desses restos vegetais e animais é fonte de energia para organismos do solo (tanto macro e mesofauna quanto biomassa microbiana).

Dessa interação entre os organismos e as fontes de MOS, usualmente definida como processo de decomposição, ocorre a formação de substâncias húmicas e não húmicas, além de outros produtos na forma mineral e gases. Embora represente apenas 1-5%, a MOS é um dos principais componentes do solo, pois influencia fortemente a produtividade das plantas e aspectos ambientais, fornecendo nutrientes para as plantas, além de influenciar nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo condições favoráveis ao crescimento vegetal.

A MOS é um constituinte do solo bastante importante na sustentabilidade da produção vegetal. Embora em pequenas quantidades, ela é importante, quando mineralizada, no fornecimento de nutrientes para as plantas, além de influenciar nas propriedades físicas (na redução da densidade do solo, na conseqüente elevação da porosidade do solo e no aumento da retenção de água), químicas (geração de cargas negativas, aumentando a capacidade de troca de cátions do solo) e biológicas do solo (sobretudo

associadas à ciclagem de nutrientes para as plantas). Portanto, a MOS (expressa pelo carbono do solo) é chave para a manutenção e mesmo aumento da qualidade (“saúde”) do solo. E auxilia diretamente na promoção de condições favoráveis ao crescimento vegetal.

No entanto, os produtos da MOS não ficam infinitamente no solo. O tempo em que permanecem no solo é chamado de tempo médio de residência. Segundo esse conceito, pode-se categorizar a MOS em fração ativa (MRT de dias-meses), fração lenta (anos-décadas) e passiva (séculos-milênios). Portanto, há um constante fluxo de entrada e saída de carbono do solo. Nesse contexto, há pelo menos duas métricas de expressão desse elemento no solo: teor de carbono (exemplos de unidades: % C ou miligrama de C por grama de solo) e estoque de carbono (uma quantidade de carbono numa dada camada de solo por unidade de área).

Claramente, a segunda forma de expressão, por estoque de carbono no solo, é a tecnicamente mais correta, sendo que as unidades mais utilizadas, para uma dada camada de solo (exemplos: 0-10 cm ou 0-30 cm, ou 0-100 cm de profundidade), têm sido quilograma por metro quadrado ( $\text{kg m}^{-2}$ ) ou mesmo toneladas por hectare ( $\text{t ha}^{-1}$ ).

## ► Abordagens para avaliação das mudanças nos estoques de carbono no solo

Em um dado sistema nativo, o estoque de carbono no solo está em equilíbrio dinâmico (“*steady-state*”); ou seja, as entradas e saídas de C se compensam. Quando o sistema nativo é alterado por atividades antrópicas, o equilíbrio dinâmico é rompido, e normalmente as entradas são menores do que as saídas, conduzindo a uma redução da quantidade de C e modificando a qualidade dos compostos organominerais.

O estoque de carbono no solo é ainda influenciado por uma série de fatores, tais como: tipo de solo (sobretudo relativo à fração mineral), tipo de vegetação (contribuição da parte aérea e sistema radicular), clima (seco/frio versus úmido/quente), relevo (topografia pode privilegiar, por exemplo, acúmulo de C em regiões de baixada), organismos (quantidade e diversidade funcional), práticas de manejo (por exemplo, práticas conservacionistas, como pastagem bem manejada, sistema plantio direto na palha e integração lavoura-pecuária-florestas tendem a aumentar o C do solo; enquanto pastagens degradadas, uso excessivo de

aração/gradagem tendem a reduzir o C do solo). Portanto, considerando os vários fatores que influenciam diretamente os estoques de carbono no solo, sua avaliação adequada é uma atividade complexa e com variada incerteza associada aos resultados obtidos. Nesse contexto, várias abordagens foram propostas na tentativa de avaliação das alterações nos estoques de carbono no solo, sobretudo em função da mudança do uso da terra e/ou adoção de práticas de manejo.

Dentre as principais abordagens existentes para as estimativas da variação de estoques de C, utilizando-se ferramentas ou planilhas de cálculo, é possível mencionar o sistema proposto pelo “*Carbon Benefits Project*” (CBP) e a ferramenta “EX-ACT”, proposta pela FAO. Adicionalmente, há os métodos de cálculo baseados nos Tier 1, Tier 2 e Tier 3 do IPCC. Essas abordagens são úteis para que se obtenham informações gerais, mas não substituem uma avaliação mais específica/criteriosa baseada em amostragem de campo e determinação dos teores de carbono no solo utilizando analisador elementar (método via seca).

O *Carbon Benefits Project* (CBP) fornece ferramentas para projetos voltados a agropecuária e silvicultura para estimar o impacto de suas atividades na mitigação das mudanças climáticas, contemplando

tanto as mudanças no estoque de carbono como nas emissões de gases de efeito estufa. As ferramentas podem ser empregadas em todas as etapas de um projeto, são gratuitas e relativamente fáceis de usar. As ferramentas são divididas em um módulo “simples” e um “detalhado”, e foram desenvolvidas pela Colorado State University e parceiros no âmbito de um projeto cofinanciado pelo *Global Environment Facility* (GEF), liderado pelo PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

O módulo simplificado utiliza valores padronizados (“*default*”) extraídos da literatura para a estimativa dos estoques de C e emissão de gases. Já no módulo detalhado, o usuário precisa inserir informações mais específicas sobre as mudanças de uso da terra e/ou práticas de manejo agrícola, como quantidade de fertilizante aplicado, tipos de culturas, formas de preparo do solo etc. Ambos os módulos do CBP geram informações gerais sobre a situação avaliada e fornecem incertezas associadas às estimativas. Tais ferramentas são úteis para avaliação geral de projetos que, diretamente ou indiretamente, almejam avaliar, grosso modo, os impactos de suas atividades nos estoques de C e emissão de gases. O próprio CBP sugere que avaliações mais precisas e que visem monitoramento sejam efetuadas com dados diretamente obtidos em condições de campo

e mensurados mais especificamente para cada situação (<https://banr.nrel.colostate.edu/CBP/>). A ferramenta EX-ACT (*Ex-Ante Carbon-balance Tool*) foi desenvolvida pela FAO com o intuito de fornecer estimativas ex-ante do impacto de projetos de desenvolvimento agrícola e florestal nas emissões dos gases do efeito estufa e no sequestro de carbono, mostrando os seus efeitos no balanço de carbono. Para tanto, a ferramenta usa os valores padrão extraídos dos relatórios do IPCC (Tier 1) e/ou coeficientes mais específicos obtidos da literatura para algumas situações associadas a sistemas *agrossilvipastoris* (Tier 2).

O usuário tem acesso a um conjunto de planilhas Excel interligadas para efetuar as estimativas dos potenciais acúmulos ou perdas de carbono no solo e da emissão de gases do efeito estufa. Há informações que permitem conhecer as incertezas associadas a tais estimativas. Assim como as ferramentas do CBP, o EX-ACT não foi concebido para prover informações detalhadas nem específicas para uma dada situação. Trata-se de ferramentas úteis para o conhecimento geral das magnitudes dos valores de estoques de C e da emissão de gases de atividades associadas a agropecuária e sistemas florestais (<http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-inicio/pt/>).

O IPCC classificou as abordagens metodológicas para estimativas nacionais das emissões de gases do efeito estufa e estoques de carbono em três “Tiers” (níveis) diferentes, de acordo com a quantidade de informações necessárias e o grau de complexidade analítica (IPCC, 2003, 2006). O Tier 1 utiliza os fatores de emissão padrão (“default”) fornecidos pelo IPCC, de abrangência geral. Nesse sentido, segundo o documento do IPCC (IPCC 2003, 2006) o método de avaliação de mudança de estoque não é aplicável no contexto do Tier 1 devido aos requisitos de dados mais específicos da situação a ser avaliada. O Tier 2 baseia-se na mesma abordagem metodológica que o Tier 1, mas utiliza fatores de emissão e outros parâmetros específicos do país.

Os fatores e parâmetros de emissão específicos do país são os mais apropriados para as florestas, regiões climáticas e sistemas de uso da terra naquele país. Dados de atividades mais altamente estratificados podem ser necessários para a abordagem do Tier 2 de modo a corresponder aos fatores e parâmetros de emissão específicos do país para determinadas regiões e categorias especializadas de uso da terra. No Tier 3, utilizam-se modelos de simulação que devem ser adaptados para atender às circunstâncias nacionais. Implementados adequadamente, os modelos de simulação podem ser combinados

com sistemas de informação geográfica para abranger maiores extensões territoriais.

O progresso do Tier 1 para o Tier 3 pode representar uma potencial redução na incerteza das estimativas das emissões de gases do efeito estufa e variação nos estoques de carbono, mas ainda não se equiparam às reduzidas incertezas associadas ao procedimento que preconiza a coleta de amostras no campo, análise em laboratórios especializados e cálculo dos estoques de carbono; conforme será discutido nos itens a seguir.

Pode-se dizer que as abordagens aqui apresentadas são úteis para o conhecimento geral dos valores dos estoques de carbono, usualmente acompanhados de elevada incerteza, uma vez que o objetivo de tais ferramentas é prover uma informação genérica/grosseira, e usualmente mais aplicável a contextos mais amplos de inventários e estimativas, antes de um dado projeto/ação ter sido efetivamente implementado (ou seja, “ex-ante”).

Portanto, para a quantificação de situações específicas de mudança de uso da terra e/ou práticas de manejo agrícola e para o monitoramento das mudanças dos estoques de C no solo, é altamente recomendável

que a avaliação seja baseada em dados de amostras coletadas em condições reais de campo, conforme proposto pelo IPCC (2006).

Para tanto, faz-se necessário coletar amostras de solo no campo, preparar adequadamente as amostras coletadas, determinar o teor de C do solo em laboratório especializado e expressar corretamente os resultados na forma de “estoques de carbono”; conforme será apresentado nos itens a seguir.

## ► Cálculo dos estoques de carbono do solo

Avaliações com maior precisão e exatidão sobre os estoques de carbono do solo devem ser baseadas na coleta de amostras de solo, preparo dessas amostras, determinação dos teores de C em laboratórios especializados e na correta expressão dos resultados analíticos (por meio de cálculo dos estoques de carbono para uma dada camada de solo). O cálculo do estoque de C é baseado na seguinte equação:

$$\text{Estoque C} = \text{teor C} \times \text{densidade solo} \times \text{espessura da camada avaliada}$$

Portanto, há a necessidade de se determinar não somente o teor de C do solo, mas também a densidade do solo e a espessura da camada avaliada. A seguir serão apresentadas informações importantes para uma adequada avaliação dos estoques de C do solo.

## ► Coleta de amostras de solo para determinação do estoque de carbono

Na caracterização do teor de C do solo de uma área, geralmente não é possível examinar o solo todo; portanto, é necessário coletar amostras. As amostras de solo coletadas devem ser as mais representativas de toda a área avaliada. A pré-seleção da área pode ser feita usando mapas de solo, mapas de uso da terra, fotografias aéreas, imagens de satélite e entrevistas sobre o histórico de uso da terra. Paralelamente ao trabalho de escritório, as visitas ao local podem ser usadas para avaliar a localização exata dos pontos de amostragem. Idealmente, esse local deve ser o

mais homogêneo possível e representativo do uso da terra ou prática de manejo adotada. Sempre que possível, selecionar a parte mais plana do relevo e atentar-se sobre o tipo de solo no qual as amostras serão coletadas, sobretudo no que se refere à sua textura. Comparações entre usos da terra ou práticas de manejo devem ser realizadas em solos sob a mesma textura (de preferência com diferença inferior a 5-10% nos teores de argila dos solos avaliados).

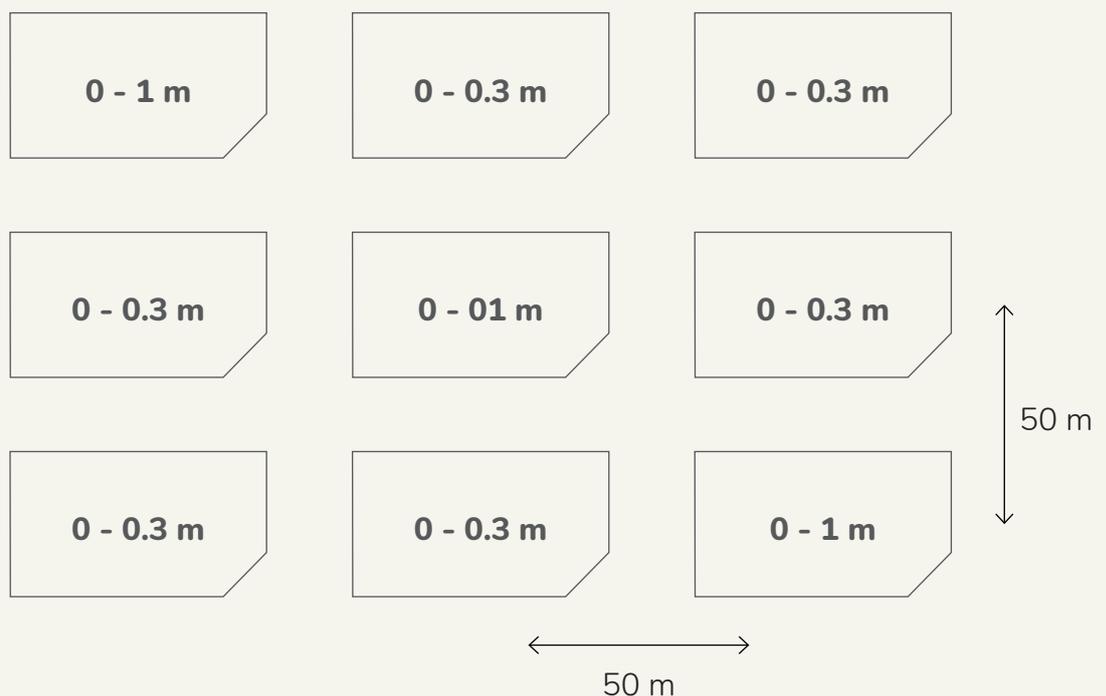
O esquema de amostragem em grade fornece uma boa cobertura da área, permitindo a identificação futura do local para fins de nova amostragem. Cada área deve ser georreferenciada usando um dispositivo GPS, e os pontos de amostragem devem ser plotados em um mapa da área. Uma grade 3 × 3, totalizando 9 trincheiras, distantes 50 metros uma da outra (**Figura 3**), cobrindo uma área de 1 hectare, é adequada para avaliações em áreas sob vegetação nativa e alteradas por atividades antrópicas (agricultura, pecuária, silvicultura etc).

O IPCC sugere que pelo menos 0,3 m superficial do perfil do solo seja considerado. Entretanto, vários autores enfatizaram a necessidade de investigar os estoques de C do solo em camadas mais profundas ao avaliar o impacto das mudanças no uso da terra e práticas de manejo,

preferencialmente até 1,0 m de profundidade.

Para tanto, é preciso coletar amostras em camadas estratificadas do solo, uma vez que o C no solo não possui comportamento linear ao longo do perfil. As amostras devem estar em camadas de 0,1 m até 1 m de profundidade em três das nove trincheiras. Nas três trincheiras mais profundas, as amostras devem ser coletadas nas seguintes camadas do solo: 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8; 0,8-0,9 e 0,9-1,0 m. Já nas seis trincheiras restantes, as amostras podem ser coletadas apenas nas camadas superficiais (0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m) conforme sugerido por *Cerri et al. 2013* e ilustrado na **Figura 3**.

**Figura 3.** Esquema de amostragem para determinações de carbono no solo e densidade do solo. As nove trincheiras cobrem uma área de 1 hectare. Em seis trincheiras, são retiradas amostras de solo nas profundidades 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Nas três trincheiras restantes, o solo é amostrado a cada 0,1 m até a profundidade de 1,0 m.



Uma vez estabelecida e marcada a grade de amostragem no campo, a amostragem do solo consistirá em duas etapas:

- ▶ Obter acesso ao ponto de amostragem (remover o eventual material vegetal da superfície do solo e cavar as trincheiras até a profundidade desejada);
- ▶ Realizar a coleta das amostras de solo.

A maior parte do resto vegetal eventualmente existente na superfície deve ser removida manualmente, com cuidado. As trincheiras mais profundas devem medir 1,5 m (profundidade) × 1,5 m (comprimento) × 1,0 m (largura), e as trincheiras menores devem medir 0,4 m × 0,4 m × 0,4 m. Depois que as trincheiras são escavadas, as amostras de solo são coletadas em incrementos de 0,1 m, usando uma faca, espátula ou outro utensílio que permita retirar um volume de terra na camada amostrada (*Figura 4*).



**Figura 4.**

Coleta de amostras de solo em trincheiras de 1,5 m de profundidade para amostragem até a camada 90-100 cm.

Em áreas agrícolas, as amostras devem ser coletadas tanto nas linhas quanto nas entrelinhas, a fim de detectar possíveis diferenças espaciais relacionadas ao tráfego de máquinas, operações de preparo do solo e outros efeitos de práticas de manejo.

## ► Preparo das amostras coletadas

Após coletadas, as amostras de solo devem ser preparadas para a análise no laboratório. Para tanto, devem ser secas ao ar, homogeneizadas e tamisadas em peneira de 2 mm, obtendo-se duas frações: terra fina seca ao ar menor que 2 mm (TFSA) e fração maior que 2 mm, constituída por raízes e pequenas rochas.

Para a determinação do teor de C pelo método de via seca (método mais recomendado devido à sua elevada precisão), uma subamostra com cerca de 6 g de terra fina seca ao ar deve ser moída o suficiente para passar pela peneira de 60 meshes, malha com diâmetro menor que 0,250 mm. Posteriormente, pesam-se aproximadamente 20 a 30 mg da terra moída em balança analítica de cinco casas decimais, sendo essa quantia disposta em cápsulas de estanho com dimensão de 8 x 5 mm para a determinação do teor de C no analisador elementar (método via seca) (*Figura 5*).



**Figura 5.**

Etapas de preparo das amostras coletadas (peneiramento e moagem), pesagem e equipamento analisador elementar para determinação do teor de C da amostra.

## ► Determinação do teor de C no solo pelo método “via seca” ou “analisador elementar”

O princípio geral do método de via seca (também denominado de método da combustão ou determinação via analisador elementar) é a oxidação do C e a decomposição térmica de minerais carbonatados pelo aquecimento de uma mistura solo-catalisador em um forno de resistência ou com circulação de oxigênio (temperatura em torno de 1.000 a 1.500 °C).

Para tanto, utiliza-se um equipamento denominado analisador elementar. O princípio da maioria dos aparelhos utilizados para análise está relacionado à medida do C do solo baseada na quantificação do CO<sub>2</sub> por infravermelho médio, sendo que o CO<sub>2</sub> é formado pela oxidação dos constituintes orgânicos e inorgânicos da amostra.

Um aspecto importante a ser mencionado é que, no momento da amostragem do solo, deve-se analisar a possível presença de minerais carbonatados, como fragmentos de rocha ou minerais secundários (nódulos carbonáticos), que, em áreas agrícolas, podem ser resultado da aplicação recente de calcário como corretivo ou fertilizantes nitrogenados. Como o procedimento não discrimina a origem dos elementos, o conhecimento do histórico da amostra é importante na avaliação e interpretação dos resultados.

A grande vantagem desse método está na elevada exatidão e precisão dos resultados analíticos. Mas se trata de método caro e que exige equipamento sofisticado (analisador elementar), além de técnico treinado para a operação. Algumas considerações sobre a determinação do

teor de C via método de combustão:

▶ Caso o interesse seja na determinação do teor de C (quando na presença de calcário), é necessário:

- 1)** Acidificar a amostra para eliminar o C do calcário ( $\text{CO}_2$ );
- 2)** Analisar a amostra contendo C na forma orgânica.

▶ Caso o interesse seja na determinação do teor de C (quando na presença de carvão):

- 1)** Eliminar o carvão por flotação com líquido inorgânico com densidade elevada;
- 2)** Analisar a amostra desprovida de carvão.

▶ Caso o interesse seja na determinação do teor de C orgânico e mineral, quando a amostra sabidamente contém C orgânico + calcário (C inorgânico), é preciso efetuar as seguintes etapas:

- 1)** Proceder com a determinação do total de C;
- 2)** Acidificar (usualmente com HCl) a amostra para remoção do carbonato (fração inorgânica);
- 3)** Quantificar o C da amostra desprovida de carbonato (contendo somente C na forma orgânica);
- 4)** Calcular a diferença entre C total e C orgânico.

Há outros métodos para determinação do teor de C do solo, sendo que o mais conhecido é o “Walkley

& Black”, também denominado de “via úmida” ou “dicromato de potássio”. Esse método é mais indicado para análises de rotina para avaliação da fertilidade do solo e possui menor precisão do que a determinação do teor de C obtido pelo analisador elementar. Mais informações sobre o método de determinação do teor de carbono do solo para fins de avaliação da fertilidade do solo podem ser encontradas no BOX a seguir.

### MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO DO SOLO PARA FINS DE AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO (EXPRESSÃO EM MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO)

O princípio geral do método de C por via úmida (também chamado de oxidação com dicromato ou Walkley & Black) é baseado na oxidação do C na forma orgânica com íons dicromato em meio ácido e determinação do material facilmente oxidável. Esse método é mais apropriado para avaliação da fertilidade do solo em laboratórios de análise de rotina. O dicromato de potássio, em presença de  $H_2SO_4$  e a quente, transforma em  $CO_2$  todas as formas facilmente oxidáveis de C do solo. A reação associada à determinação do teor de C da amostra de solo é apresentada a seguir:



O excesso de dicromato é titulado com uma solução de sal de Mohr  $[(\text{NH}_4)_2 \text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \dots 6\text{H}_2\text{O}]$ . Além disso, existe um fator de recuperação de 77% (60-86%) para conversão do C orgânico facilmente oxidável para o C orgânico total. A padronização é feita com 25 e 50 mg de EDTA. Mais detalhes sobre esse método podem ser encontrados em *Walkley (1947)*.

Algumas observações e críticas relativas ao presente método são:

- ▶ Trata-se do método mais utilizado nos laboratórios de rotina do Brasil, pois não exige equipamentos específicos;
- ▶ Determina-se somente o C na forma orgânica (apenas C orgânico facilmente oxidável, por isso a necessidade de utilização do fator de recuperação). Portanto, não é um método adequado para solos com presença significativa de C inorgânico;
- ▶ Não é um método considerado limpo, pois gera resíduos contendo, por exemplo, cromo e ácido sulfúrico.

Alguns laboratórios que realizam análises de rotina para fins de avaliação da fertilidade do solo apresentam o teor de MO total de um solo em suas análises de rotina. Esse valor de MO total é obtido multiplicando-se a %C por um fator com valor constante de aproximadamente 1,73. Esse fator é derivado de trabalhos principalmente da pesquisadora russa Kononova, que, nas décadas dos 50 e 60, determinou que o conteúdo médio de C de ácidos húmicos extraídos de diferentes solos era de aproximadamente 58.

Como os pesquisadores da época consideravam húmus como sinônimo de MOS, esse fator de 1,73 (100/58) foi introduzido para estimar a MOS. Embora as substâncias húmicas representem a maior porcentagem da MOS, atualmente esse índice deixou de ser utilizado em pesquisas, pois outros constituintes além dos ácidos húmicos, com diferentes teores de C, também são considerados como MOS.

## ► Determinação da densidade do solo

A densidade do solo é definida como a massa da unidade de volume. São considerados dois tipos principais de densidade: a real ou das partículas e a aparente ou global. A densidade real ou das partículas não é afetada pelo arranjo dos sólidos do solo nem pela textura e porosidade. Depende apenas da natureza mineralógica e do conteúdo de matéria orgânica. Na densidade aparente ou global, é levado em conta o volume total do solo, inclusive a porosidade. Para o cálculo dos estoques de C do solo, utiliza-se a densidade global ou aparente.

A densidade global vem sendo determinada pelo anel volumétrico e pelo método da parafina ou do torrão: o primeiro é mais usado nas avaliações relacionadas aos estoques de C no solo. O procedimento preconiza a introdução do anel na camada que se deseja avaliar (coincidente com a camada de solo amostrada para determinação do teor de C), com cuidado, para não compactar o solo na

extremidade do batedor (**Figura 6**). É preciso retirar o anel, aparando o excesso de solo dos dois lados com uma faca. Colocar em caixa de alumínio, fechá-la bem com fita crepe e, no laboratório, secar em estufa a 105-110 °C por 24 horas e pesar (avaliar a umidade, se quiser). O cálculo do volume do anel leva em consideração a equação  $V = \pi r^2 h$  e, usualmente, a unidade de expressão da densidade global é  $g\ cm^{-3}$  (ou  $t\ m^{-3}$ ).



**Figura 6.**  
Trado coletor de amostras indeformadas (utilizando anel volumétrico) para determinação da densidade do solo.

## ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO VIA EQUAÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA

As equações de pedotransferência representam uma estratégia cada vez mais utilizada para a estimativa de atributos dos solos com o propósito de suprir a ausência de informações sobre determinadas propriedades. Essa abordagem vem sendo utilizada no intuito de estimar atributos do solo que demandam elevado tempo de execução e/ou são caros de serem obtidos. Neste contexto, modelos de regressão ou funções de pedotransferência podem ser usados para estimar, por exemplo, a densidade do solo de camadas que não foram amostradas.

A estimativa da densidade do solo é uma das maiores fontes de incerteza para os cálculos dos estoques de C. Embora a determinação da densidade global do solo seja oriunda de uma relação entre a massa de terra e o volume ocupado, variáveis que teoricamente são de fácil obtenção, é fato que existe dificuldade em se obter informações seguras e precisas sobre essa densidade (Barros & Fearnside, 2015). Isso vem estimulando a criação de muitas predições da densidade do solo que exploram as relações entre esse parâmetro e outras variáveis mais comumente disponíveis em inventários pedológicos, a fim de garantir a confiabilidade sobre os estoques de carbono e reduzir os custos de avaliação (Bernoux et al., 1998).

As equações de pedotransferência construídas com base em parâmetros comuns em inventários pedológicos, como teor de carbono e quantidade de argila, mostram grande potencial para representar as medidas diretas de densidade do solo quando essas são de difícil acesso ou estão indisponíveis (Benites et al., 2007).

$$\text{Densidade do solo (0-30 cm) (g cm}^{-3}\text{)} = 1,56 - (0,0005 \times \text{ARG}) - (0,01 \times \text{CO}) - (0,0075 \times \text{SB})$$

$(r^2 = 66\%, \text{ Benites et al., 2007})$

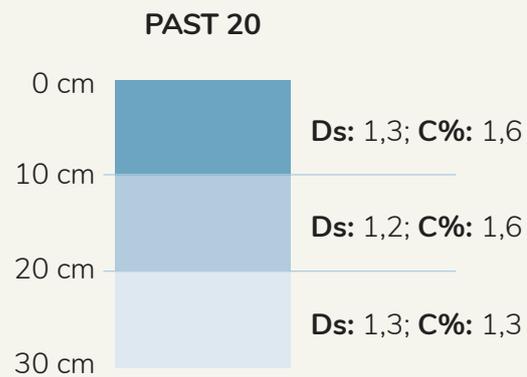
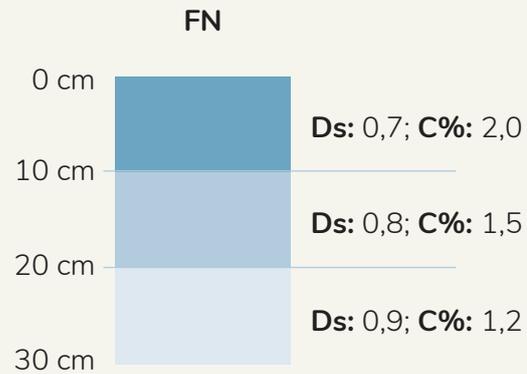
Onde: ARG = conteúdo de argila (g kg<sup>-1</sup>); CO = carbono orgânico (g kg<sup>-1</sup>); SB = Soma de bases (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>).

Todavia, deve-se mencionar que a mensuração dos valores de densidade global do solo em condições de campo é sempre mais confiável e reflete menor incerteza do que a utilização de valores estimados a partir de equações de pedotransferência elaboradas a partir de atributos tão ou mais complexos e que podem apresentar elevada variabilidade espacial.

## ► Expressão dos resultados dos estoques de C do solo: comparação da mesma massa de solo

Como as amostras de solo são coletadas no campo sempre em camadas fixas, pode-se incorrer em erros no cálculo dos estoques de C em razão da variação da densidade do solo devido à mudança de vegetação ou prática de manejo. Portanto, considerando que o estoque de C também é uma função da densidade do solo, fatores como tráfego de máquinas e preparo do solo, que afetam a densidade, podem influenciar nos resultados. Corrigindo a densidade de todos os locais para uma área de referência, a comparação de estoques será feita considerando a mesma massa de solo (Ellert e Bettany, 1996). Os estoques de carbono nas áreas avaliadas devem ser calculados em uma profundidade equivalente, considerando a profundidade que contém a mesma massa de solo que a camada correspondente da área de referência. As áreas de referência são geralmente um local sob vegetação nativa ou um uso anterior da terra (por exemplo, pastagem), dependendo do histórico de uso da terra da área avaliada. Considerando os dados fornecidos

abaixo, vale notar a diferença nos cálculos dos estoques de carbono pelo método de camada equivalente (camada fixa) e considerando massa equivalente (ou seja, comparação dos estoques de carbono considerando a mesma massa de solo para os dois usos da terra) para distintos ambientes de floresta nativa (FN) e pastagem com 20 anos (PAST20).



## ► Resolução

Camada equivalente				Massa equivalente			
Sistema	Camada	Massa de solo	EC	Sistema	Camada	Massa de solo	EC
	m	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>		m	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
	0-0,1	70	1,40	FN	00-0,1	70	1,40
	0,1-0,2	80	1,20		0,1-0,2	80	1,20
FN	0,2-0,3	90	1,08		0,2-0,3	90	1,08
<b>Total para 0,30 m</b>			<b>3,68</b>	<b>Total para 0,30 m</b>			<b>3,68</b>
	0-0,1	130	2,08	PAST 20	00-0,054	70	1,12
PAST 20	0,1-0,2	120	1,80		0,053-0,067	80	1,20
	0,2-0,3	130	1,69		0,067-0,069	90	1,17
<b>Total para 0,30 m</b>			<b>5,57</b>	<b>Total para 0,30 m</b>			<b>3,49</b>

### BASE DE CÁLCULO

#### ► Massa de solo para a floresta nativa

Camada 0-0,1:  $((100*100*0,7*0,1)*1000)/10000= 70 \text{ kg/m}^2$

Camada 0-0,2:  $((100*100*0,8*0,1)*1000)/10000= 80 \text{ kg/m}^2$

Camada 0-0,3:  $((100*100*0,9*0,1)*1000)/10000= 90 \text{ kg/m}^2$

#### ► Massa de solo para a pastagem

Camada 0-0,1:  $((100*100*1,3*0,1)*1000)/10000= 130 \text{ kg/m}^2$

Camada 0-0,2:  $((100*100*1,2*0,1)*1000)/10000= 120 \text{ kg/m}^2$

Camada 0-0,3:  $((100*100*1,3*0,1)*1000)/10000= 130 \text{ kg/m}^2$

► Correção da camada para o solo de pastagem com base na massa de solo da floresta

Primeira camada

0,1.....130  
 X.....70  
 = 0,054 m

Segunda camada

0,1.....120  
 X.....80  
 = 0,067 m

Terceira camada

0,1.....130  
 X.....90  
 = 0,069 m

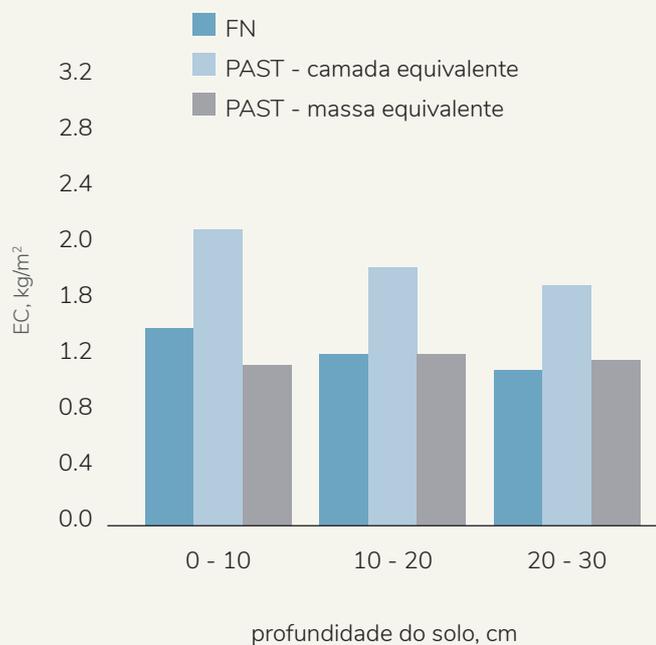
► Estoque de C para a pastagem corrigido

Camada 0-0,1:  $((0,054 * 2,08 * 10) = 1,12 \text{ kg/m}^2$

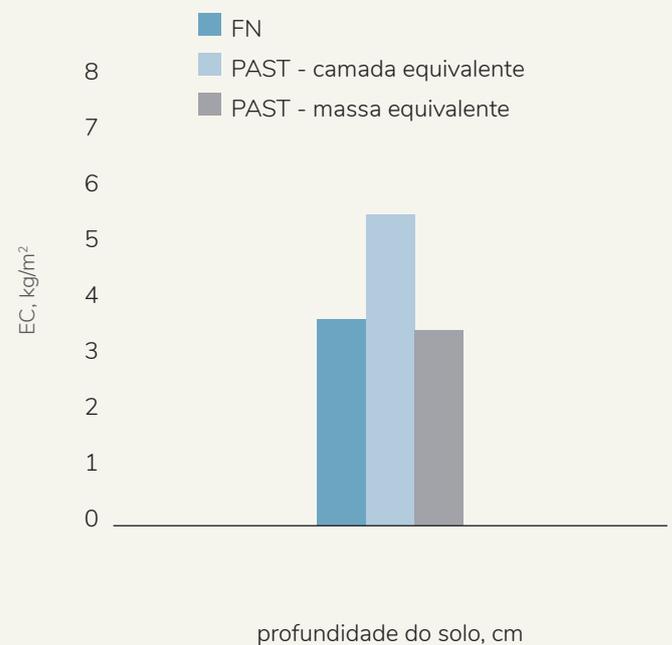
Camada 0-0,2:  $((0,067 * 1,8 * 10) = 1,20 \text{ kg/m}^2$

Camada 0-0,3:  $((0,069 * 1,69 * 10) = 1,17 \text{ kg/m}^2$

ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO POR CAMADA



ESTOQUE DE CARBONO PARA A PROFUNDIDADE DE 0 A 30 CM

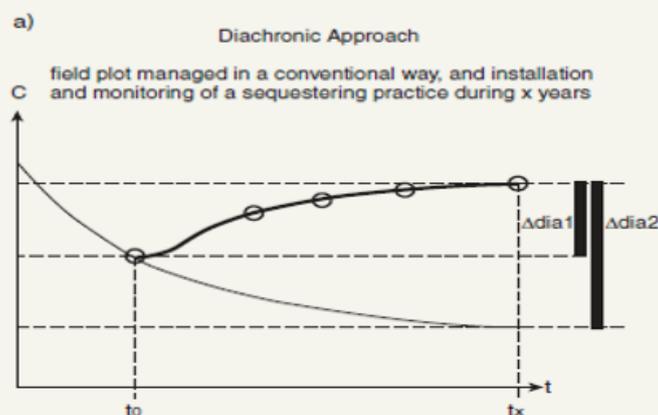


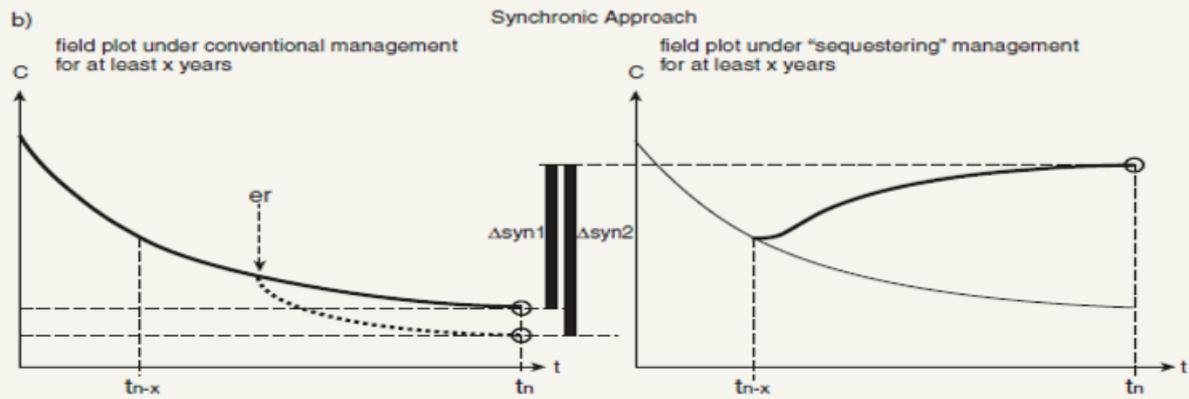
## ABORDAGENS DIACRÔNICA E SINCRÔNICA

Existem duas abordagens distintas de amostragem de solo para avaliação dos estoques de C do solo: diacrônica e sincrônica (**Figura 1**, Fonte: Bernoux et al., 2006).

- ▶ No primeiro, os estoques de C no solo são medidos ao longo do tempo no mesmo local (parcelas de campo) com diferentes tratamentos de uso ou manejo da terra (exemplo: experimento em condições de campo). Isso é caro e geralmente tem uma limitação de tempo de avaliação, uma vez que o carbono do solo pode levar longo tempo para mostrar diferenças significativas.
- ▶ Na segunda abordagem (sincrônica ou cronossequência), as amostras são coletadas ao mesmo tempo em parcelas no campo sob diferentes sistemas de uso ou manejo da terra. Nessa abordagem, os estoques de C do solo da área a ser avaliada são comparados com os estoques de solo sob estado de referência inicial (usualmente sob vegetação nativa). A principal premissa com a abordagem sincrônica ou cronossequência, onde o espaço substitui o tempo, é que as condições do solo, topografia, clima etc. sejam semelhantes entre si, sendo que a única variável seria o tempo de adoção do uso da terra ou prática de manejo (Costa Junior et al., 2013).

Em teoria, as abordagens diacrônica e sincrônica devem fornecer aproximadamente os mesmos resultados referentes aos estoques de C do solo. Todavia, na prática, na abordagem sincrônica é praticamente impossível eliminar todos os fatores ambientais que influenciam os estoques de C do solo devido à alta variabilidade espacial, principalmente das propriedades do solo.





**Figura 7.**

Comparação das abordagens diacrônica (a) e sincrônica (b).

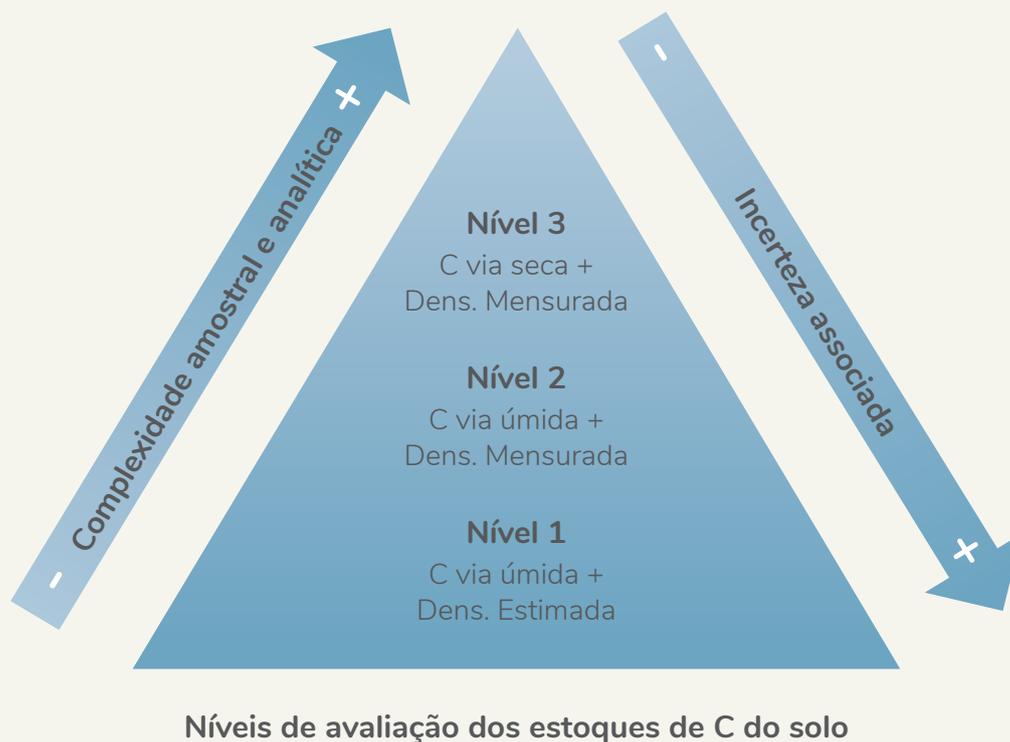
Círculos pretos correspondem à determinação dos estoques de carbono. "er" significa erosão.

Fonte: Bernoux et al. (2006).

## INCERTEZA ASSOCIADA À MENSURAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO

Conforme já mencionado neste documento, há vários métodos de determinação dos teores de carbono do solo (tais como o método via úmida, também denominado Walkley & Black, e o método via seca ou analisador elementar) e formas de estimar os valores de densidade do solo (como por meio de equações de pedotransferência). Ambas são informações imprescindíveis para o cálculo dos estoques de carbono do solo.

Apesar de serem possíveis os usos dos resultados oriundos da determinação de carbono pelo método via úmida e as estimativas de densidade do solo por meio de equações de pedotransferência, essas opções usualmente propiciam uma elevada incerteza associada aos cálculos dos estoques de carbono do solo. A **Figura 8** ilustra um gradiente com três níveis de determinação dos teores de carbono e densidade do solo e suas respectivas incertezas associadas.



**Figura 8.**

Ilustração esquemática dos níveis de avaliação dos estoques de carbono do solo.

Nesse contexto, recomenda-se o nível 3 (**Figura 8**) para se obter uma menor incerteza associada ao cálculo do estoque de carbono do solo. Isso significa coleta de amostras em condições de campo para determinação dos teores de carbono pelo método via seca (por analisador elementar), mensuração da densidade do solo em condições de campo (uso de equações de pedotransferência em casos muito específicos para os quais não seja possível a direta mensuração com amostras coletadas no campo) e uma eventual necessidade de ajustes dos cálculos para que sejam comparadas massas equivalente de solo nas situações para as quais se pretende comparar os estoques de carbono (ver mais detalhes em BOX anterior). Os níveis 1 e 2 da **Figura 8** são úteis para dar uma ideia geral sobre tendências e estimativa de magnitude do valores dos estoques, mas possuem uma maior incerteza, geralmente não condizente com as exigências requeridas por instituições diretamente ligadas ao tema de mensuração de carbono do solo.

## ► Considerações finais

O uso agrícola do solo com técnicas convencionais de cultivo, incluindo arações e gradagens, além da degradação de pastagens, tem sido apontado como uma das principais causas das emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, potencializando o aquecimento global, cujas consequências adversas podem influenciar a própria produtividade agrícola. Mais recentemente, a adoção de sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema de plantio direto na palha, a adoção de técnicas de manejo de pastagem e de sistemas integrados de produção agricultura, pecuária e floresta (ILPF) têm modificado esse paradigma. Pesquisas mostram que essas práticas podem, por um lado, reduzir as emissões de gases para a atmosfera e, por outro, incorporar e armazenar carbono no solo, o qual encontrava-se anteriormente na atmosfera sob a forma de CO<sub>2</sub>.

Dessa forma, os sistemas conservacionistas de manejo, além de diminuir os custos de produção sem alterar a produtividade, têm a função de mitigar as mudanças climáticas globais. Todavia, apesar do claro benefício ambiental que eles produzem, esses sistemas ainda não são necessariamente reconhecidos para requerer créditos de carbono no

âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. São necessárias, então, ações políticas imediatas para fazer com que essa redução de emissão de gases e o sequestro de carbono pelo solo, devido à adoção de usos da terra e sistemas conservacionistas, sejam amplamente reconhecidos como atividades elegíveis. Para tanto, um dos entraves é a falta de conhecimento sobre a avaliação dos estoques de carbono do solo para análise do sequestro de C. O presente material auxilia na elucidação de aspectos importantes associados à adequada avaliação dos estoques de carbono no solo, e na consequente abordagem sobre os potenciais de sequestro de carbono em sistemas sob vegetação nativa, além daqueles alterados por atividades antrópicas.

## ▶ Referências bibliográficas

- ▶ BARROS, H.S.; FEARNSTIDE, P.M. *Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia*. Revista Brasileira de Ciência do Solo (2015), 39:397-407.
  - ▶ BENITES, V.M.; MACHADO, P.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, R.M.; MADARI, E.B. *Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil*. Geoderma (2007), 139: 90-97.
  - ▶ BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. *Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. (1998), 62: 743-749.
  - ▶ BERNOUX, M.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; ESCHENBRENNER, V.; CERRI, C. E. P. *Soil carbon sequestration In: Erosion & Carbon Dynamics* ed. New York: CRC Publisher, 2006, v.15, p. 13-22.
  - ▶ BRASIL (2015) intended Nationally Determined Contributions (iNDC) - Brazil. [http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRAZIL\\_iNDC\\_english.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRAZIL_iNDC_english.pdf). Acesso 23 out 2019.
  - ▶ CERRI, C.E.P.; GALDOS, M.V.; CARVALHO, J.L.N.; FEIGL, B.; CERRI, C. C. *Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view*. Scientia Agrícola (2013), 70: 361-368.
  - ▶ COSTA JUNIOR, C.; CORBEELS, M.; BERNOUX, M.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; FEIGL, B.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; SCOPEL, E.; LAL, R. *Assessing soil carbon storage rates under no-tillage: comparing the synchronic and diachronic approaches*. Soil & Tillage Research (2013), 134: 207-212
  - ▶ ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. *Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes*. Canadian Journal of Soil Science (1996), 75: 529-538.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2003). PENMAN J. et. al. *Good Practice Guidance for Land Use, land - Use Change and Forestry*. IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- ▶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). EGGLESTON, S. et. al. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC/IGES, Hayama, Japan.
  - ▶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). *Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM\\_Approved\\_Microsite\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf). Acesso 25 out de 2019.
  - ▶ SEEG (2019). *Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Mapa das estimativas das emissões de gases de efeito estufa por estado no Brasil*. <http://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso 25 out de 2019.

# Estimativa do sequestro de carbono no solo pela reabilitação de pastagens degradadas no cerrado

## ► Considerações iniciais

No Brasil, a mudança de uso da terra (MUT) e a agricultura são responsáveis por 72% das emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo que a pecuária de corte a pasto é a atividade que mais contribui com essas emissões (Seeg, 2020). A pastagem é a principal forma de uso do solo no Brasil, cobrindo aproximadamente 181 milhões de ha (Lapig, 2020<sup>1</sup>). Historicamente, as pastagens são o primeiro uso da terra, sendo implantadas após o corte e queima da vegetação nativa (Mazzetto et al., 2015). As pastagens se beneficiam da fertilidade natural do solo e dos nutrientes depositados pelas cinzas provenientes da queimada (Araújo et al., 2011). Contudo, devido à natureza extensiva da pecuária, pouco ou nenhum manejo é adotado nas pastagens

<sup>1</sup> <https://pastagem.org/atlas/map>

após a implantação, acarretando na sua degradação (Mazzetto et al., 2015). Estima-se que, no Brasil, cerca de 35% (64 milhões de ha) das pastagens apresentem algum grau de degradação, das quais 37% (23,7 milhões de ha) se concentram no bioma cerrado (Lapig, 2020). As principais causas são a falta de reposição dos nutrientes e o superpastejo, que acarretam na diminuição do vigor das plantas e na sua morte (Oliveira, et al., 2016; Xu et al., 2016).

Diversos trabalhos indicam que, quando as pastagens estão degradadas, ocorre perda de carbono no solo, pois a morte da gramínea leva à diminuição do aporte de C nesse solo (Braz et al., 2013; Oliveira, et al., 2016). Por outro lado, diversos estudos também mostram o potencial da recuperação de pastagens degradadas ao acumular C, possibilitando manter os níveis de estoque de C no solo iguais ou superiores aos da vegetação nativa (Braz et al., 2013; Oliveira et al., 2016). A ciclagem do robusto sistema radicular associada com o pouco ou nulo revolvimento do solo são apontados como os principais fatores para o acúmulo de C no solo quando áreas degradadas são reabilitadas.

Levando em conta o potencial de acúmulo de C no solo em áreas de pastagens degradadas, a recuperação delas é apontada como uma forma

de mitigar as emissões de GEE. Nesse sentido, com o intuito de reduzir essas emissões pelo setor agrícola, o governo brasileiro lançou em 2010 o Plano ABC (Brasil, 2012). Uma das principais ações desse plano é a recuperação de 15 milhões de ha de pastagem até 2020. Em 2015, por meio da iNDC (Brasil, 2015), o governo brasileiro propôs reduzir as emissões de GEE em 43% entre os níveis de 2005 e 2030. Para alcançar essa meta, o setor agrícola tem fundamental importância, uma vez que é o principal emissor e, ao mesmo tempo, apresenta alta capacidade em estocar carbono no solo e em biomassa. Dessa forma, somando as metas do Plano ABC e NDC, o Brasil propõe a recuperação de 30 milhões de ha de pastagens até 2030.

Nesse contexto, este documento tem o objetivo de (1) recomendar formas de se quantificar o sequestro de carbono por meio de amostragens de solo, utilizando diferentes níveis de precisão, e (2), com base em dados da literatura, avaliar os potenciais de sequestro de carbono do solo por meio da recuperação de pastagens degradadas no cerrado.

## ► **Recomendações de amostragem de solo para a estimativa do sequestro de C pela reabilitação de pastagens degradadas**

A consideração do compartimento do solo nos reservatórios de contabilização de carbono relacionados, principalmente, ao gerenciamento sustentável das pastagens é extremamente relevante.

Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de GEE, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001). Sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de C no solo são alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de CO<sub>2</sub> atmosférico, contribuindo para mitigar o aquecimento global (Bayer et al., 2006). Solos descobertos ou submetidos a práticas de movimentação intensa, em diferentes estágios de degradação, constituem fonte de GEE.

No entanto, a estimativa do estoque de carbono (EC) no solo é o grande gargalo de inventários de emissões e remoções de GEE para o setor agropecuário. Monitorar

o estoque de carbono em solos tem sido um desafio para atender projetos que promovam a adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono. As estimativas de EC no solo dependem do teor de carbono (C) e da densidade do solo (DS), usada para converter C em porcentagem de peso seco para peso de C por unidade de área (Howard et al., 1995). Ademais, os solos são sistemas extremamente complexos, espacialmente heterogêneos em diferentes escalas e incluem processos biogeoquímicos com dinâmica temporal característica. A estimativa de carbono no solo em sistemas agropecuários tem complexidades adicionais em comparação com outros usos da terra.

Ainda, as metodologias de quantificação de redução de emissões de GEE recomendadas por programas de verificação de projetos de carbono, instituições acadêmicas e IPCC são tecnicamente sólidas, porém, geralmente, inviáveis economicamente para o produtor rural.

Assim, a primeira parte do presente relatório buscou destacar a robustez técnica da metodologia de estimativa de estoque de carbono no solo considerada como “padrão”. Posteriormente, também foram recomendados aspectos

metodológicos alternativos, com o objetivo de dar mais escala às estimativas de redução de emissões de GEE para reabilitação de pastos no Brasil. O esquema abaixo ilustra didaticamente as relações metodológicas, e seus respectivos níveis, que serão abordadas ao longo do relatório (*Figura 9*).

**Figura 9.**  
Trado coletor de amostras indeformadas (utilizando anel volumétrico) para determinação da densidade do solo.



**Níveis de avaliação dos estoques de C do solo**

Por fim, há diferentes métodos disponíveis para a determinação do estoque de carbono nos solos agrícolas. A seleção do método mais apropriado para qualquer projeto de carbono deve considerar vários fatores, incluindo a natureza dos solos examinados, a exatidão do método e os custos da análise (LAL, 2004).

Geralmente, os procedimentos analíticos recuperam todas as formas de carbono, a partir da conversão dessas formas para CO<sub>2</sub>, utilizando combustão seca ou úmida. O CO<sub>2</sub> extraído é quantificado por técnicas volumétricas, titulométricas, gravimétricas, espectrométricas ou cromatográficas (Silva et al., 1999). Porém, existem diferenças nos resultados das análises de carbono no solo de acordo com o método utilizado (Ferreira, 2013). Assim, é possível buscar correlação entre os protocolos de análise de solo aplicando um índice de correlação entre os métodos (Sato, 2013), possibilitando visualizar os resultados de estoque de carbono das mesmas amostras de solo por diferentes métodos analíticos. Dessa forma, os dados coletados em campo em diferentes locais podem ser comparáveis aos encontrados na literatura, independentemente do método de análise laboratorial aplicado.

## ► Determinação do estoque de C: teor de C no solo pelo método “via seca” ou “analisador elementar”, e de densidade do solo via amostragem

Esse método é o considerado padrão e serve para estimar o sequestro de carbono no solo onde o teor de carbono é analisado pelo método via seca, e quando a densidade do solo é determinada por anel volumétrico. Geralmente, esse nível se aplica para amostras de solo coletadas, por exemplo, pelos critérios definidos a partir do guia *IPCC 2003 Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (IPCC, 2003) e pelos padrões para certificação de reduções de emissões de carbono em projetos de crédito de carbono.

O carbono determinado por análise elementar via seca é o método direto e utilizado pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática) nos seus guias para elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) utilizados pelo mundo todo. É considerado o método padrão. O primeiro estudo de comparação entre a combustão seca e os métodos via úmida foi realizado por

Kalembasa e Jenkinson (1973), que demonstraram que esse método é mais eficiente na recuperação do carbono orgânico que todos os demais testados.

O método consiste na oxidação por via seca e é realizado por análise elementar, na qual, normalmente, são quantificados os elementos C, H, N, S e O. A oxidação das amostras ocorre em alta temperatura (aproximadamente 1.000 °C). Então, elas são finamente moídas e colocadas em cápsula de estanho, as quais não contêm carbono. Após combustão total, os gases contendo cada elemento são separados e as concentrações, medidas por diferentes tipos de detectores, que variam de acordo com o equipamento/fabricante. Os tipos mais comuns são detectores de condutividade térmica (TCD) e de infravermelho (IR).

No entanto, ainda é um método caro, com elevado custo de cada análise e da manutenção dos equipamentos, sendo de difícil acesso por parte dos produtores rurais em comparação com a determinação do teor total de carbono no solo pelos outros métodos<sup>2</sup>. Além disso, no Brasil, somente os institutos de pesquisa e as universidades estão preparados para fazer as análises de carbono total via seca (análise elementar), mas eles estão no limite da sua capacidade operacional. Ademais, por esse método, a densidade do solo

---

<sup>2</sup> Limitações técnicas da análise elementar (via seca): como esse tipo de análise determina o carbono total do solo, pode ocorrer a superestimação do conteúdo de CO dos solos que receberam calcário recentemente ou daqueles solos mais alcalinos.

é determinada diretamente por amostragem de campo com o uso do anel volumétrico. Consiste na obtenção da massa por pesagem e do volume pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada; realizada com um cilindro de volume interno conhecido. Dependendo da profundidade de coleta, é necessária a abertura de trincheiras, o que pode acarretar em impacto físico na área amostrada.

Em geral, o método é adequado para solos bem estruturados. É conveniente amostrar com solo úmido (friável). Solos muito secos poderão ser umedecidos para uma coleta mais adequada, se a umidade atual não for de interesse. Para alguns solos (expansíveis), é recomendado descrever a umidade ou potencial do solo no momento da coleta. Os cilindros deverão ter um corte em bixel para facilitar sua penetração no solo e evitar a compactação das amostras dentro do cilindro. A inserção do cilindro no solo se faz por percussão ou com o uso de macacos hidráulicos.

Em resumo, a coleta de amostra para determinação da densidade do solo, apesar de ser a forma direta e internacionalmente aceita por diversos protocolos de inventários de GEE, requer conhecimento especializado e dispêndio alto de recursos com material de campo e consultoria técnica. Portanto, além de métodos alternativos, é

necessário o uso de outros parâmetros de mais fácil obtenção para a determinação da densidade do solo e, posteriormente, do estoque de carbono. Nos próximos itens do presente relatório, para ambos parâmetros (C no solo e densidade), serão propostos novos caminhos metodológicos, considerando sempre a premissa da robustez técnica dos resultados.

## ► **Determinação do estoque de C: utilizando métodos alternativos à “via seca” e de densidade do solo via amostragem**

Esse método é considerado alternativo. Serve para estimar o sequestro de carbono no solo quando o teor de carbono orgânico é analisado por via úmida e/ou quando não se tem disponíveis análises da densidade do solo. Geralmente, esse nível se aplica para amostras de solo coletadas e analisadas para fins de fertilidade, quando são fornecidos valores da quantidade de matéria orgânica (MOS) e atributos físicos (i.e. quantidade de areia, silte e argila) e químicos (i.e. macronutrientes) do solo.

## DETERMINAÇÃO DO TEOR DE C NO SOLO A PARTIR DE VALORES DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS)

A determinação indireta do carbono via matéria orgânica do solo (MOS), obtida em análises de fertilidade, comuns nos laboratórios de solo brasileiros e realizadas rotineiramente pelos produtores rurais, apresenta-se como a alternativa mais viável econômica e logisticamente.

Além do mais, tal determinação indireta do carbono no solo via MOS também é aceita pelo novo protocolo para certificação pecuária no Brasil lançado pela Embrapa em 2018: o Carne Baixo Carbono e Carne Carbono Neutro.

Considera-se, no geral, que a MOS contém cerca de 58% de carbono em relação à sua massa total. Por isso, a determinação de carbono orgânico total (COT) tem sido utilizada para estimar a fração orgânica do solo (Nelson; Sommers, 1996). Assim, o COT é determinado indiretamente por meio do teor de MOS<sup>3</sup> com a seguinte expressão:

$$MOS = 1,724 \times COT$$

Fonte: (NELSON; SOMMERS, 1982)

<sup>3</sup> Em média a MOS tem 58% de C.

Atualmente, diversos métodos são utilizados em laboratórios de rotina e pesquisa para determinação do COT. Cada método apresenta suas vantagens e suas limitações, além de terem diferentes relações com a textura do solo (Madari et al., 2005), mineralogia (Zinn et al., 2007), formas de uso e tipos de substratos (Conyers et al., 2011; Carmo; Silva, 2012). Por isso, ainda não foi definido um método considerado como o mais preciso e inequívoco. Várias metodologias estão em uso, dificultando a comparação de resultados experimentais quando diferentes métodos são empregados, assim como gerando problemas na comparação dos estoques de C dos solos.

Dentre as diversas metodologias empregadas para determinação de carbono, destaca-se a desenvolvida por Walkley & Black (WB), que utiliza o princípio da combustão úmida com agentes oxidantes, como o dicromato. O método de Walkley & Black (1934) é ainda o mais empregado em laboratórios de solos devido à sua simplicidade, requerimento de instrumentação simples e de baixo custo, além de quantificar a matéria orgânica facilmente oxidável, de grande interesse para a fertilidade do solo. Entretanto, problemas ambientais, devido ao uso de cromo, têm estimulado a substituição desse procedimento por outros que geram menor quantidade de resíduos potencialmente tóxicos. Ao longo dos anos, surgiram

variações e aperfeiçoamentos desse método, como aquele que acrescentou aquecimento externo para favorecimento da reação (Mebius, 1960) (ME), além de diversas variações na etapa de quantificação do carbono, como o uso do método colorimétrico (CO).

Com a ampliação de programas governamentais de incentivo ao uso de sistemas conservacionistas de baixa emissão de carbono e com o avanço do mercado voluntário de carbono, aumentou a necessidade de acompanhamento das variações de carbono no solo e, conseqüentemente, a necessidade de padronizar os valores de carbono por meio de fatores de regressão linear entre os diferentes métodos.

Na **Tabela 1** abaixo, é possível verificar as correlações entre os teores de C obtidos por diferentes métodos analíticos via úmida, principalmente comparando com o método padrão CNH (via seca). O trabalho avaliou diferentes métodos analíticos empregados na determinação do carbono orgânico numa ampla diversidade de solos do cerrado, buscando identificar aqueles que apresentem maior precisão e exatidão, bem como buscou possíveis correlações existentes entre os protocolos atualmente em uso (Sato, 2013). Observa-se que as correlações foram maiores

que 85% entre o método padrão (CHN) e os demais métodos via oxidação úmida (WB, ME e COL), mostrando que as reações de oxidação e recuperação de carbono são semelhantes (Gatto et al., 2009).

**Tabela 1.**  
Correlação linear entre C obtido por diferentes métodos via úmida e via seca<sup>4</sup>.

Relação	Equação	R2*
CHN x WB	$C_{WB} = 0,8411C_{CHN} - 3,8053$	0,86
CHN x ME	$C_{ME} = 0,9262C_{CHN} - 3,6793$	0,88
CHN x COL	$C_{COL} = 0,961 C_{CHN} - 5,7021$	0,85

**CHN** – Análise elementar (Método padrão IPCC)

**WB** – Walkley & Black/ **ME** – Mebius

**COL** – Colorimétrico

\* Significativo a 5% de probabilidade

Fonte: Sato (2013)

### DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO A PARTIR DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS (EQUAÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA)

As estimativas de estoque de carbono (EC) no solo dependem do teor de carbono (C) e da densidade do solo (DS), usada para converter C em porcentagem de peso seco para peso de C por unidade de área (Howard et al., 1995). Porém essas variáveis apresentam grande variabilidade espacial e temporal, e sua quantificação é trabalhosa, pouco precisa e gera impactos negativos no ambiente

<sup>4</sup> Utilizando cinquenta e quatro amostras de solo na camada de 0-20 cm foram coletadas em áreas representativas de diferentes regiões do bioma Cerrado (Sato, 2013).

(Machado, 2005). A informação de DS nem sempre está disponível na literatura, pois é trabalhosa de ser obtida no campo, principalmente abaixo de 30 cm de profundidade (Frazão et al., 2010; Siqueira Neto, 2009).

A estimativa de DS pode ser realizada por meio de diversos atributos de solos de fácil determinação. As frações argila, areia e silte são conhecidas por terem efeito sobre a DS (Manrique; Jones, 1991; De Vos et al., 2005; Pachepsky, et al., 2015). Kaur et al. (2002) utilizaram teores de argila, silte, areia e C. No Brasil, Bernoux et al. (1998), Tomasella e Hodnett (1998) e Benites et al. (2007) usaram os atributos teores de argila, silte, C e o pH em água.

O termo função de pedotransferência (PTF, da sigla em inglês para *pedotransfer function*) foi proposto por Bouma (1989) para se referir aos modelos matemáticos para predição de atributos do solo de difícil determinação, que utilizam como variáveis para diagnóstico atributos que são facilmente medidos e de baixo custo (MacBratney et al., 2002).

Cidin (2016) e Boschi et al. (2015) organizaram um banco de dados de solos da Embrapa com 38.456 amostras. Após triagem, foram desenvolvidas funções de pedotransferência (PTF) para avaliação do efeito na estimativa de EC; avaliação do desempenho da PTF e

estimativa do EC. Utilizou-se um subconjunto de 974 dados para desenvolver PTF de modo a estimar a densidade do solo (DS). A melhor PTF desenvolvida explicou 60% da variância da DS<sup>5</sup>. Na **Tabela 2** é possível observar os valores de EC calculados a partir da DS e estimados pela PTF. Além do mais, os resultados de Cidin (2016) e Boschi et al. (2015) indicaram que erros observados nas estimativas de DS não se propagaram no cálculo de EC. A confirmação por meio dos testes constitui uma importante contribuição para a definição de estratégias de monitoramento de EC em solos brasileiros.

**Tabela 2.**  
Valores do estoque de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) calculado a partir da DS observada (Obs) e da DS estimada a partir da PTF desenvolvida (Boschi et al., 2015).

Densidade do solo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	10 quartil	Mediana	30 quartil	Valor máximo
	$\text{Mg ha}^{-1}$						
OBS	62,04	39,49	11,18	37,08	57,58	75,94	290,40
PTF	61,63	33,11	12,80	39,19	56,45	74,52	214,98

PTFs desenvolvidas por outros autores também apresentam bons coeficientes de variação ( $R^2$ ) no Brasil e no mundo. Bernoux et al. (1998) foram dos primeiros a propor uma PTF para estimar DS de solos tropicais e utilizaram como atributos preditores textura, teores de C e tipo de solo. Benites et al. (2007)<sup>6</sup>, utilizando atributos químicos

<sup>5</sup>  $DS = 1,112 + (0,0002913 \text{ Areia}) - (0,007817C) - (0,0002217 \text{ Argila}) + (0,06125 \text{ pH}_{\text{H}_2\text{O}})$   $R^2 = 0,6$ ; DS: densidade do solo  $\text{g cm}^{-3}$ , Argila e Areia  $\text{g kg}^{-1}$ , C: Carbono orgânico do solo  $\text{g kg}^{-1}$  e  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  (adimensional).

<sup>6</sup>  $DS = 1,56 - (0,0005 \text{ Argila}) - (0,01.C) + (0,0075 \text{ SB})$   $R^2 = 0,7$ ; DS: densidade do solo  $\text{g cm}^{-3}$ , Argila  $\text{g kg}^{-1}$ , C: Carbono orgânico do solo  $\text{g kg}^{-1}$  e SB: soma de bases ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$ )

e físicos de 1.542 horizontes de solos do Brasil, desenvolveram uma PTF para prever a densidade de solos brasileiros da maior parte dos biomas, a partir de dados de argila, C e soma de bases (SB)<sup>7</sup>. Encontraram  $R^2$  ajustado de 0,71. Huntington et al. (1989) obtiveram um  $R^2$  de 0,75 para estimar DS a partir de teores de matéria orgânica de 60 dados de solos. Ademais, 75% dos valores de EC a 30 cm, calculados por meio de PTF para estimar densidade, situaram-se entre 72,55 e 79,71 Mg ha<sup>-1</sup>; ou seja, próximos ao EC observado, que foi de 75,94 Mg ha<sup>-1</sup>.

## ▶ Comparação do estoque de C no solo a partir dos procedimentos metodológicos padrões e alternativos

Neste item foram considerados três grupos metodológicos para determinação do estoque de C no solo:

▶ **Abordagem padrão:** teor de C no solo determinado via seca + densidade do solo pelo anel volumétrico;

<sup>7</sup> A Soma de Cátions ou Soma de Bases é um tipo de informação obtida rotineiramente em análises de fertilidade de solo realizadas, geralmente, anualmente pelos produtores rurais antes do início dos plantios.

► **Abordagem alternativa:** teor de C no solo

determinado via MOS + densidade do solo pela PTF;

► **Abordagem híbrida:** teor de C no solo determinado via seca + densidade do solo pela PTF.

De forma a comparar resultados de estoque de C no solo por diferentes métodos, foi realizada na Fazenda Água Viva, do Grupo Roncador, amostragem para posterior determinação do estoque de carbono no solo por meio do teor de carbono via seca e via úmida e densidade pelo método direto (anel volumétrico)<sup>8</sup>. Abaixo, seguem os respectivos resultados (*Tabelas 3 e 4*).

**Tabela 3.**

Estoque de carbono ao longo do perfil no solo das áreas amostradas na Fazenda Água Viva (0-30 cm).

Descrição	Teor de C via seca	Teor de C via MOS	Estoque C observado via seca	Estoque C observado via MOS	Estoque C estimado via seca e PTF	Estoque C estimado via MOS e PTF	Densidade observada	Densidade estimada <sup>9</sup>
	g/kg <sup>-1</sup>		(t.ha <sup>-1</sup> )				(g cm <sup>-3</sup> )	
Pasto degradado	5,95	8,27	24,24	34,70	27,61	37,78	1,60	1,52
Pasto recuperado	13,72	21,77	57,18	95,20	59,04	88,39	1,30	1,35

Descrição	Teor de C via seca	Teor de C via MOS	Estoque C observado via seca	Estoque C observado via MOS	Estoque C estimado via seca e PTF	Estoque C estimado via MOS e PTF	Densidade observada	Densidade estimada
	%							
Pasto degradado	-	38,88	-	43,15	13,90	55,86	-	-5,00
Pasto recuperado	-	58,62	-	66,49	3,25	54,58	-	3,85

**Tabela 4.**

Diferença entre os estoques de C e densidade do solo determinados via método padrão e alternativo na Fazenda Água Viva (0-30 cm) em porcentagem.

<sup>8</sup> A amostragem do solo foi realizada em 2015 como parte do projeto Carbono Araguaia da Liga do Araguaia. Mais detalhes em: <http://www.ligadoaraguaia.com.br/>

<sup>9</sup> Segundo a PTF desenvolvida em Benites et al. (2007).

Pode-se observar que a PTF proposta por Benites et al (2007) funcionou bem para os solos da fazenda localizada no município de Água Boa/MT, bioma cerrado, pois a diferença entre a densidade do solo observada (medida diretamente pelo anel volumétrico) e a densidade estimada (pela PTF) foi de apenas 5% no pasto degradado e de 3,85% no pasto recuperado. Diante disso, podemos concluir que a diferença entre o estoque de C no solo calculado usando o método analítico padrão e o alternativo deu-se, sobretudo, pela diferença analítica do teor de C no solo (via seca e via MOS).

No entanto, ao se utilizar a abordagem híbrida (estoque de C estimado via seca e PTF), a diferença do estoque de C no solo entre essa abordagem e a abordagem padrão foi pequena, sendo de 13,90 para pasto degradado e de apenas 3,25% para pasto recuperado.

Apesar de diferenças maiores com algumas estimativas, é verdade que um bom manejo de pastagem pode aumentar os estoques de carbono no solo de superfície (até 30 cm de profundidade), se comparado aos estoques em pastagens bem manejadas.

## ▶ Prós e contras, incerteza, complexidade e custo

O monitoramento do estoque de carbono nos solos tem sido um desafio para o setor agrícola.

O carbono no solo determinado pela combustão a seco é o método direto usado pelo IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) - considerado o método padrão. No entanto, como já dito, ainda é um método caro, são necessárias muitas amostras pontuais, com um alto custo de cada análise e manutenção de equipamentos e difícil acesso pelos produtores rurais. Além disso, no Brasil, apenas os institutos e universidades de pesquisa estão preparados para realizar a análise do carbono no solo por combustão a seco.

Atualmente, vários métodos de combustão úmida são usados em laboratórios de rotina e de pesquisa para determinar o COS. Em geral, os métodos de combustão úmida têm as características abaixo:

- ▶ Análise de rotina em laboratórios brasileiros (MOS estimada em análises de fertilidade do solo);

- ▶ O fator de correlação pode ser usado para comparar diferentes métodos analíticos;
- ▶ Já incluído nos custos rotineiros do agricultor (baixo custo).

Além da estimativa do carbono do solo, o relatório propõe estimar a densidade aparente (BD) por função de pedotransferência (PTF) (estimativa indireta da densidade aparente), eliminando a coleta deformada do solo (com anel volumétrico). A determinação direta da densidade aparente requer a coleta em campo por uma equipe técnica especializada, utilizando amostras não deformadas, coletadas em anéis de volume conhecido (cilindros) e subsequente avaliação laboratorial, tornando essa avaliação extremamente cara e demorada.

Assim, a tabela abaixo (**Tabela 5**) mostra um resumo das metodologias alternativas mais utilizadas no Brasil para determinar o carbono no solo (C via úmida e gravimetria), a metodologia padrão (C via seca) e a densidade do solo via anel e pela PTF, com seus prós e contras. O uso dessas metodologias alternativas (via úmida e PTF) pode dar escala aos projetos de carbono para a agricultura regenerativa no Brasil.

Métodos	Visão geral	Vantagens	Desvantagens
<b>C no solo via úmida</b>			
<b>Walkley &amp; Black (WB)</b>	A oxidação do carbono orgânico do solo ocorre por íons dicromato em uma solução fortemente ácida, e a quantidade de íons Cr <sup>3+</sup> + reduzidos é determinada pela titulação do dicromato (em excesso) com íons Fe <sup>2+</sup> .	É o método mais utilizado nos laboratórios brasileiros, tem execução simples, baixo custo, boa precisão, não requer o uso de equipamentos especializados, além de oxidar as frações de matéria orgânica mais reativas do solo.	Os métodos via úmida não promovem a oxidação completa do carbono orgânico do solo, não atingindo as formas elementares de carbono.  Geração de resíduos potencialmente tóxicos (uso de cromo), sobretudo no WB.
<b>Mebius (ME)</b>	O método ME é semelhante ao método WB. No entanto, a oxidação do carbono orgânico do solo é maximizada pela adição de calor, aumentando a eficiência da reação.	É um método comum nos laboratórios brasileiros, tem execução simples, não requer o uso de equipamentos especializados, tem baixo custo, alta oxidação do carbono orgânico do solo, maior quantidade de carbono detectada (comparado ao método WB).	
<b>Colorimétrico (COL)</b>	Neste método, o processo ocorre da mesma maneira que na oxidação de dicromato, porém a determinação final é feita por espectrofotometria, e não por titulação (WB e ME).	Utiliza quantidades menores de reagentes, reprodutibilidade simples e fácil e sem erros de titulação.	
<b>C no solo via seca – método padrão</b>			
<b>Análise elementar</b>	Baseados em procedimentos de combustão quantitativos, com a determinação de carbono como CO <sub>2</sub> . Chamado de combustão seca.	Método direto e utilizado pelo IPCC nos seus guias para elaboração de inventários de emissões de GEE utilizados pelo mundo todo.  Possibilita que um maior número de amostras seja analisado em menor tempo.	Método caro, com elevado custo de cada análise e de manutenção dos equipamentos, e de difícil acesso por parte dos produtores rurais.  Limitações técnicas: i) necessidade de moagem muito fina das amostras, que torna o processo mais dispendioso; ii) utilização de pequena quantidade de amostra (em geral, de 10 a 1.000 mg), que pode levar a problemas de representatividade do solo (Chatterjee et al., 2009).

Métodos	Visão geral	Vantagens	Desvantagens
<b>Densidade aparente</b>			
<b>Função de pedotransferência (PTF)</b>	PTF são modelos matemáticos para estimar atributos do solo difíceis de determinar, usando atributos fáceis de determinar e de baixo custo. Estimativa indireta da densidade aparente por PTF.	Estimativa de densidade com atributos de solo facilmente determinados (conteúdo de argila e carbono e a soma de bases trocáveis, por exemplo). De acordo com o princípio da conservatividade.	O desempenho da função pode ser menor quando aplicado em um ambiente diferente daquele que foi ajustado.
<b>Anel volumétrico</b>	Coleta de amostra indeformada com o uso do anel volumétrico, onde a densidade aparente do solo é definida como a razão entre a massa do sólido do solo e o volume total.	Medida direta do parâmetro importante de caracterização física da estrutura do solo e como um indicador de sua compactação.	Quantificação trabalhosa, pouco precisa e gera impactos negativos no ambiente (abertura de trincheiras). Amostragem: é necessário ter muitas repetições. Dispêndio elevado de tempo para as análises laboratoriais.

**Tabela 5.**  
Recomendações metodológicas para estimar o carbono e a densidade aparente do solo.

Com relação às incertezas, a estimativa do estoque de carbono no solo incorre obrigatoriamente em uma série de decisões, sejam relacionadas à abrangência de coleta, seja a caminhos metodológicos, e cada qual tendo consequências diversas para as incertezas intra e interespecíficas.

Com relação à abrangência, é fundamental definir fronteiras transparentes quanto a limites regionais, temporais, da unidade de análise e dos sistemas produtivos que a compõem. Cada decisão deixa um dado estudo mais específico, tornando-o

menos aplicável para comparações gerais com outros estudos (incerteza interespecífica). Apesar disso, a definição de abrangência é passível de ser realizada com relativa clareza, com baixo impacto para incertezas intraespecíficas.

Por fim, além das decisões relacionadas à abrangência, o cálculo do estoque de C incorre em decisões metodológicas importantes. Inicialmente, com relação à diretriz metodológica a ser utilizada para nortear o estudo – se metodologias diretas ou indiretas para determinação dos parâmetros necessários. Mais detalhes sobre a classificação qualitativa das incertezas das três abordagens para determinação do estoque de C no solo se encontram na **Tabela 6** abaixo.

**Tabela 6.**  
Incertezas relacionadas à etapa laboratorial das amostras de solo para determinação do estoque de carbono.

Abordagem	Fonte dos dados	Análise da incerteza
Padrão	C via seca + densidade via anel	<b>Baixa:</b> C e DS estimadas diretamente; portanto as incertezas nas estimativas de ambos parâmetros estão relacionadas, sobretudo, à etapa de coleta de solo.
Híbrida	C via seca + densidade via PTF	<b>Média:</b> a incerteza está relacionada ao uso de PTFs desenvolvidas em regiões distintas das áreas de interesse do projeto.
Alternativa	C via MOS + densidade via PTF	<b>Alta:</b> C e DS estimadas indiretamente. Nesse caso as incertezas estão relacionadas à escolha incorreta da PTF e incompleta oxidação da MOS.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração em projetos relacionados ao estoque de carbono no solo (permitindo a estimativa das taxas anuais de mudança de carbono do solo para diferentes usos da terra e diferentes práticas de manejo) diz respeito ao delineamento da amostragem de solo.

Entender a dinâmica de remoção de carbono na fazenda ao longo do tempo requer observações por vários anos. Nesse tipo de abordagem, chamada de diacrônica, os estoques de C no solo são medidos ao longo do tempo no mesmo local (parcelas de campo) com diferentes tratamentos de uso ou manejo da terra (exemplo: experimento em condições de campo). Isso é caro e geralmente tem uma limitação de tempo de avaliação, uma vez que o carbono do solo pode levar longo tempo para mostrar diferenças significativas.

Portanto, o método alternativo chamado de sincrônica ou cronossequência visa solucionar os entraves relacionados, principalmente, à questão de tempo da abordagem diacrônica. Nessa segunda abordagem, as amostras são coletadas ao mesmo tempo em parcelas no campo sob diferentes sistemas de uso ou manejo da terra. A principal premissa com a abordagem sincrônica

ou cronossequência, na qual o espaço substitui o tempo, é que as condições do solo, topografia, clima etc. sejam semelhantes entre si; a única variável seria o tempo de adoção do uso da terra ou a prática de manejo. Essa abordagem fornece uma avaliação integrada da mudança do carbono no solo em uma área maior do que, por exemplo, numa amostragem ao longo do tempo com um ou dois campos experimentais. O ideal é que a abordagem de cronossequência forneça os mesmos resultados que a abordagem diacrônica. No entanto, as cronossequências devem ser usadas com precaução, pois são suscetíveis aos efeitos confusos da heterogeneidade espacial e o manejo do solo. Braz et al. (2013), por meio de coletas diacrônicas e sincrônicas, verificaram que a textura (teor de argila) foi o parâmetro que mais influenciou a dinâmica de carbono no solo em diferentes usos.

Para estimativa do estoque de carbono do solo, além da abordagem de coleta utilizada, é necessário considerar outras questões de campo:

► **Estratégia:** Os pontos coletados devem ser georreferenciados e, preferencialmente, o contorno do talhão ou da área amostrada também deverá ser identificado digitalmente, de modo a situar sua posição geral em mapas de localização. A

posição geográfica deverá ser tão precisa quanto possível, para permitir posteriormente o retorno ao local amostrado. Os dados deverão ser registrados em combinação com outras informações de campo e arquivados no banco de dados do projeto.

► **Estratificação:** A escolha do local de coleta está vinculada à avaliação prévia de sua representatividade em termos locais e regionais, com base em consulta às informações disponíveis de bases de dados de solos e inventários florestais nas regiões estudadas. Essa representatividade deve contemplar as características físicas do local (classe de solo, geologia, topografia, posição na paisagem, microclima, etc.) e também de sistema de produção (material genético plantado, sistema de produção adotado, histórico da área, planejamento de uso, etc.). Recomenda-se que todas as áreas avaliadas tenham previamente um estudo de classificação do solo (Santos et al., 2013), bem como histórico dos cultivos anteriores, doses e fontes de adubação, práticas de manejo adotadas e tempo de cultivo.

► **Camadas:** São recomendadas as camadas de 0 a 40 cm, de profundidade estratificada de 10 em 10 cm, como as obrigatórias na fase inicial e na fase de acompanhamento com relação à avaliação dos teores de carbono no solo. A utilização de camadas

estratificadas, por exemplo, de 10 em 10 cm até 100 cm de profundidade, são alternativas bem-vindas para aperfeiçoar o acompanhamento.

► **Área de referência:** Recomenda-se que seja identificada uma área de referência da condição original ou inicial da área de estudo. A área de referência será utilizada como linha de base para quantificar as mudanças nos estoques de carbono do solo, sendo preferencialmente uma área sob vegetação nativa ou uma área de controle de uso do solo antes da conversão para florestas. Quando a área de referência é uma floresta nativa, que esteja localizada em área de reserva legal e/ou de preservação permanente (APP).

Com relação aos custos, podem-se verificar na **Tabela 7** os custos embutidos em todas as análises de solo necessárias para uma correta estratificação da área a ser inventariada, além da determinação do estoque de C no solo na linha de base e ao longo do monitoramento da atividade ABC (agricultura de baixa emissão de carbono), como pastos bem manejados ou reabilitados. Os custos foram determinados com base em valor atual, considerando: i) os requisitos necessários descritos nas metodologias padrão para inventários de GEE; ii) os requisitos necessários das metodologias alternativas para a determinação do estoque de carbono no solo.

Na **Tabela 7** não estão inclusos os custos de consultoria técnica necessária para a coleta de solo indeformada com o uso do cilindro para a determinação da densidade aparente do solo. Essa é uma forma de coleta que requer um conhecimento técnico prévio dos protocolos, pois qualquer tipo de erro amostral se propaga na determinação final do estoque de C. Esse custo é de difícil estimativa, pois depende da experiência da consultoria contratada, região, tempo de duração da coleta, tipo de solo, etc. Portanto, o custo total de uma amostra de solo para determinação do estoque de C, considerando a metodologia padrão, é maior do que o apresentado na **Tabela 7**.

**Tabela 7.**  
Custos por amostra de solo para análise dos elementos necessários, considerando a metodologia padrão e a metodologia alternativa para estoque de C no solo.

Parâmetros	Método padrão	US\$ <sup>10</sup> /amostra	Método alternativo <sup>11</sup>	US\$/amostra
C no solo	Direto – C total do solo	15,00	Indireto - MOS	4,94
Fertilidade <sup>12</sup>	-	-	Direto	
Densidade	Direto	7,73	-	-
Textura	Direto	3,22	Direto	3,22
Material de campo	Cilindro de aço inox	6,44	-	-
<b>Total</b>		<b>32,39</b>		<b>8,16</b>

Nota-se que a proposta metodológica do presente relatório diminui em 75% os custos amostrais, considerando apenas os custos laboratoriais e equipamentos.

<sup>10</sup>Taxa consultada em 10/03/2020: US\$1,00 = R\$4,66 (<https://www.bcb.gov.br/>)

<sup>11</sup>Preços ESALQ/USP ([http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/Tabela\\_Preco\\_Completa.pdf](http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/Tabela_Preco_Completa.pdf))

<sup>12</sup> Incluindo: pH, MOS, P, K, Ca, Mg, H+Al

## ► Potenciais de sequestro de carbono no solo pela recuperação de pastagens degradadas no cerrado

Os sistemas agrícolas ou condições de manejos adotados podem aumentar ou mitigar a emissão de GEE para a atmosfera. No geral, pastagens em consórcio com leguminosas forrageiras ou com ILP nos dois primeiros anos e os sistemas integrados em todos os seus arranjos têm a capacidade de armazenar carbono no solo, podendo neutralizar as emissões do sistema. Importante ressaltar que o balanço zero de emissões em sistemas com o componente animal (pecuários) depende, diretamente, da quantidade de animais na área considerada. Portanto, deve-se considerar o ótimo equilíbrio entre produtividade e emissões.

Ademais, o manejo adequado de sistemas pecuários e integrados pode aumentar os estoques de carbono a níveis até superiores aos encontrados na vegetação nativa (Neill et al., 1996). Porém, nas camadas mais profundas, esse estoque tende a ser menor (Nepstad et al., 1994).

A remoção e o armazenamento de carbono, assim como a sua permanência e reversibilidade, têm sido uma preocupação para os setores que lidam com o uso da terra e o aquecimento global, não apenas do ponto de vista científico e político, mas também da ótica econômica, com questões como créditos de carbono fazendo parte do debate (FAO, 2019).

De acordo com a prática de manejo adotada, o solo pode ser dreno ou fonte de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ . No caso do armazenamento, em média, o solo pode compensar parte ou o total das emissões de GEE do sistema entre 20 e 50 anos. A situação inversa ainda é válida em sistemas degradados ou mal manejados e também segue um limite médio de tempo para a perda de C. Esse limite de saturação ou perda é considerado um efeito finito (Stewart et al., 2007; Hillel; Rosenweig, 2010). Em solos tropicais, esse tempo médio é de 20 anos após a adoção do sistema, mas há evidências de estabilização em até 30 anos no sul do Brasil (Bayer et al., 2006). Por fim, o *Good Practice Guidance* (IPCC, 2003) adota que o ganho ou perda de carbono do solo resultante da mudança do uso da terra ocorrem durante o período máximo de 20 anos.

No mais, existem três níveis definidos pelo IPCC (2006), Tier 1, 2 e 3, para os fatores e parâmetros

de emissão utilizados nos cálculos de fluxos de carbono no solo. É importante que o cálculo dos fluxos de GEE em fazendas utilize fatores coerentes com a realidade do país, classificados como fatores regionalizados (Tier 2) pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e desenvolvidos por pesquisadores da Embrapa, dentre outras instituições. Entretanto, em alguns casos, não existem valores específicos para o Brasil. Então são utilizados fatores de emissão default globais (Tier 1), publicados por organizações reconhecidas internacionalmente na área de mudanças climáticas, como o IPCC. Os fatores e parâmetros de emissão específicos do país são os mais apropriados para as florestas, regiões climáticas e sistemas de uso da terra naquele país. Dados de atividades mais altamente estratificados podem ser necessários para a abordagem do Tier 2 para corresponder aos fatores e parâmetros de emissão específicos do país para regiões e categorias especializadas de uso da terra. No Tier 3, utilizam-se modelos de simulação, que devem ser adaptados para atender às circunstâncias nacionais. Implementados adequadamente, os modelos de simulação podem ser combinados com sistemas de informação geográfica para abranger maiores extensões territoriais.

A substituição de vegetação nativa promove mudanças no estoque de carbono no solo, que pode diminuir ou aumentar, dependendo do sistema de manejo e do tempo de estabilidade do processo de mudança. Nesse sentido, para melhor entender o potencial de sequestro de C no solo com a reabilitação para diferentes manejos e usos, foram compilados dados da literatura que avaliavam os estoques de C nos solos sob pastagens em diferentes status. Os critérios para inclusão dos estudos foram: terem utilizado amostragens no bioma cerrado e terem realizado a correção dos estoques para a mesma massa do solo (Ellert; Bettany, 1995) (**Tabela 8**).

**Tabela 8.**  
Estimativas dos fluxos de carbono no solo em diferentes transições de uso e de manejo.

Condição inicial	Condição/ Uso final	Sequestro de C no solo (t/ha/ano)	Profundidade	Referência	Observações
Pastagem degradada	Pastagem nominal	0,36	cm	Oliveira, 2018	Meta-análise incluindo mais de 60 trabalhos entre artigos e teses
	Pastagem bem recuperada	0,40	0-30	Oliveira, 2018	Meta-análise incluindo mais de 60 trabalhos entre artigos e teses
	Pastagens bem manejadas	0,61	0-30	Maia et al., 2009	Meta-análise incluindo dezenas de pastagens bem manejadas no cerrado
Pastagem degradada	Grãos – plantio direto	0,19	0-30	Maia et al., 2013	
Pastagem degradada	ILP	1,5-1,7	0-30	Martins et al., 2018; Assad e Martins, 2015	Trabalhos de levantamento de campo em diferentes localidades no Brasil usados para linha de base do Plano ABC
Plantio direto	ILP	0,8 a 2,8 Mg	0-30	Carvalho et al., 2009	
Plantio direto	ILP	0,28	0-30	Maia et al., 2013	
Pastagem degradada	Reflorestamento - Eucalipto	0,29 – 0,42	0-30	Lima et al., 2008	Áreas ocupadas com eucalipto por 34 anos

Condição inicial	Condição/ Uso final	Sequestro de C no solo (t/ha/ano)	Profundidade	Referência	Observações
Pastagem degradada	Restauração (SAF)	0,44	0-20	GHG Protocol Floresta	
Cerrado	Pastagem degradada	0,33	0-30	Oliveira, 2018	Vila Bela da Santíssima Trindade (MT), Vila Bela da Santíssima Trindade (MT), Carmolândia (TO)
Cerrado	Pastagem degradada	- 0,35			Nova Xavantina (MT), Dueré (TO), Conquista D'Oeste (MT), Paraíso (TO)
Cerrado	Pastagem nominal	1,07		Maia et al., 2009	Cáceres, MT; solo arenoso
VN	IPF	-1,53	0-30	Lemos, 2011	4 anos de idade, plantio de paricá, braquiarião e criação de gado bovino (floresta secundária 52,3 tC/ha e IPF 46,2 tC/ha)

## ► Considerações finais

Com base nos dados apresentados anteriormente, nota-se que grande parte do carbono emitido pode ser recuperado por práticas agropecuárias que aumentem a produtividade do ecossistema, retirando CO<sub>2</sub> da atmosfera e aumentando o C armazenado no sistema. Dessa forma, o carbono passa a ser mais um indicador da boa gestão das propriedades, evidenciando a presença de um sistema regenerativo e altamente produtivo.

Diante das estimativas do presente relatório, nota-se a excelente possibilidade de se obter certificações que atestem a sustentabilidade da carne e dos produtos agrícolas produzidos nas fazendas

brasileiras. Para tal, é preciso que seja adotado um monitoramento da redução de emissões de GEE a partir de práticas de pecuária sustentável. Ademais, configura-se como uma interessante oportunidade para empresas interessadas em adquirir créditos de redução de emissões diretas e indiretas de suas atividades. E também: oportunidades de negócios, de geração de valor e impacto positivo na sociedade. Para o produtor, significa mais segurança no sistema de produção, melhor gerenciamento do risco na atividade e novos indicadores de sustentabilidade. Para o consumidor, quer dizer alimentação mais saudável e sustentável.

## ▶ Referências bibliográficas

- ▶ ARAÚJO, E.A. de; KER, J.C.; MENDONÇA, E. de S.; SILVA, I.R. da; OLIVEIRA, E.K. *Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas no solo do bioma amazônico*. Acta Amazonica, v.41, p.103-114, 2011. DOI: 10.1590/S0044-59672011010200001.
- ▶ ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C. *Agricultura de baixa emissão de carbono: a evolução de um paradigma*. Revista Agroanalysis, 2015.
- ▶ BAYER, C. et al. *Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till*. Soil Tillage Research, v. 86, p. 237-245, 2006.
- ▶ BENITES, V. de M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. *Pedotransfer functions for estimating bulk density of Brazilian soils*. Geoderma, v. 139, n. 1/2, p. 90-97, Apr. 2007.
- ▶ BERNOUX, M. et al. *Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties*. Soil Science Society of America Journal, v.62, n.3, p.743-749, 1998.
- ▶ BOSCHI et al. *Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono*. Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente, v.2, n.1, p.8-16, 2015.
- ▶ BOUMA, J. *Using soil survey data for quantitative land evaluation*. Advances in Soil Science, v. 9, p. 177-213, 1989.
- ▶ BRASIL. *Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura*. Brasília, 2012.
- ▶ \_\_\_\_\_. *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. 2015.
- ▶ BRAZ, et al. *Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Pastures in the Brazilian Cerrado*. Soil Sci. Soc. Am. J. 77:914-928. 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0269
- ▶ CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PICOLLO, M.C.; GODINHO, V.P. & CERRI, C.C. *Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon*. Soil Tillage Res., 103:342-349, 2009.
- ▶ CARVALHO, J.L.N et al. *Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil*. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-290, abr. 2010.
- ▶ CARMO, D.L.; SILVA, C.A. *Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36:1211-1220, 2012.
- ▶ CIDIN, A., C., M. *Estoque de Carbono em solos brasileiros e potencial de contribuição para mitigação de emissões de gases de efeito estufa*. São Carlos: UFSCar, 2016. 75 p.
- ▶ CONYERS, M.K.; POILE, G.J.; OAETES, A.A.; WATERS, D.; CHAN. K.Y. *Comparison of three carbon determination methods on naturally occurring substrates and the implication for the quantification of 'soil carbon'*. Soil Research, 49:27-33, 2011.

- ▶ DE VOS, B. et al. *Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils*. Soil Science Society of America Journal, v.69, n.2, p.500-510, 2005.
- ▶ ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. *Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes*. Canadian Journal of Soil Science, v.75, p.529-538, 1995.
- ▶ FERREIRA, E.A.B. *Dinâmica de longo prazo do carbono do solo em sistemas de manejo no Cerrado*. Tese. Universidade de Brasília: Instituto de Ciências Biológicas. 235p. 2013.
- ▶ FRAZÃO, L. A. et al. *Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 45, p.1198- 1204, 2010.
- ▶ GATTO, A.; BARROS, N.F. de; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.; MENDONÇA, E. de S.; VILLANI, E.M. de A. *Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:735-740, 2009.
- ▶ HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. *The role of soils in climate change*. In HILLEL, D. and ROSENZWEIG, C. (Eds.). Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation Vol. 1. Imperial College Press, 2010, p. 9-20.
- ▶ HOWARD, P. J. A., LOVELAND, P. J., BRADLEY, R. I., DRY, F. T., HOWARD, D. M., HOWARD, D. C. *The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain*. Soil Use and Management, v. 11, n. 1, p. 9-15, Mar. 1995.
- ▶ HUNTINGTON, T. G. et al. *Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol*. Soil Science, v.148, n.5, p.380-386, 1989.
- ▶ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2001: The scientific basis*. 881p. Cambridge: Cambridge University, 2001.
- ▶ IPCC, 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Hayama, Japan.
- ▶ KALEMBASA, D.J.; JENKINSON, D.S. *A comparative study of titrimetric and gravimetric methods for the determination of organic carbon in soil*. J. Sci. Food Agric. 24: 1085-1090. 1973.
- ▶ KAUR, R.; KUMAR, S.; GURUNG, H. P. *A pedotransfer function soil data and its comparison with existing PTFs*. Australian Journal of Soil Research, v.40, n.5, p.847-857, 2002.
- ▶ LAL, R. *Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change*. Geoderma 123(1-2):1-22 · November 2004. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- ▶ LEMOS, E. C. M. *Emissão de dióxido de carbono e estoque de carbono em sistemas convencionais e alternativos de produção agropecuária no Nordeste paraense*. Dissertação – Universidade Federal do Pará. 2011. 90p.
- ▶ LIMA, A. M. N. et al. *Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG*. R. Bras. Ci. Solo, 32:1053-1063, 2008.
- ▶ MACHADO, P. L. O. A. *Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global*. Química Nova, v.28, n.2, p. 329-334, 2005.

- ▶ MADARI, B.E.; REEVES III, J.B.; COELHO, M.R.; MACHADO, P.L.O.A.; DE- POLLI, H.; BENITES, V.M.; SOUZA, L.F.; MCCARTY, G.W. *Mid and near infrared spectroscopic determination of carbon in diverse set of soil from the Brazilian National Soil Collection*. Spectroscopic Letters, 38:721-740, 2005.
- ▶ MAIA, S. M. F., OGLE, S. M., CERRI, C. E. P. e CERRI, C. C. (2009). *Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil*. Geoderma, 149, 84-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.023>
- ▶ MAIA, S. M. F. et al. *Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes*. Soil and Tillage Research, v. 133, p. 75-84, 2013.
- ▶ MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. *Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties*. Soil Science Society of America Journal, v.55, n.2, p. 476-481, 1991.
- ▶ MARTINS, S.C. et al. *Inverting the carbon footprint in Brazilian agriculture: an estimate of the effects of the ABC plan*. Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente. Vol. 7, No. 1, 43-52 (2018).
- ▶ MAZZETTO, A. M.; BARNEZE, A. S.; FEIGL, B. J.; VAN GROENIGEN, J. W.; OENEMA, O.; DE KLEIN, C. M. A.; CERRI, C. C. *Use of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) does not mitigate N<sub>2</sub>O emission from bovine urine patches under Oxisol in Northwest Brazil*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 101, p. 83-92, 2015.
- ▶ McBRATNEY, A. B. et al. *From pedotransfer functions to soil inference systems*. Geoderma, v.109, p.41-73, 2002.
- ▶ MEBIUS, L.J. *A rapid method for the determination of organic carbon in soil*. Analytica Chimica Acta, 22:120-124, 1960.
- ▶ NEILL, C.; FRY, B.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; MORAES, J.F.L. & CERRI, C.C. 1996. *Forest- and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils*. Oecologia 107: 113-119.
- ▶ NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, Soil Science of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010.
- ▶ NELSON D.W.; SOMMERS, L.E. *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: Methods of soil analysis. A.L. Page et al. Eds., Part 2. Agronomy 9, 2nd edition, Madison, Wisconsin, USA. 539-579. 1982.
- ▶ NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E. & VIEIRA, S. 1994. *The role of deep roots in the hydrological cycles of Amazonian forests and pastures*. Nature 372: 666-669.
- ▶ OLIVEIRA, D. C. de. *Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil*. Tese (Doutorado) - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 82 p. Piracicaba, 2018.
- ▶ OLIVEIRA, S. P. et al. *Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil*. Catena, v. 137, p. 508-516, 2016.

- ▶ PACHEPSKY, Y. A.; RAJKAI, K.; TÓTH, B. *Pedotransfer in soil physics: trends and outlook – a review*. *Agrokém és Talajtan*, v. 64, n.2, p. 339–360, 2015.
- ▶ SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.
- ▶ SATO, J.H. *Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do Cerrado*. Dissertação. 90 p. Universidade de Brasília - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2013.
- ▶ SILVA, A.C.; TORRADO, P.V; ABREU JUNIOR, J. S. *Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo*. *Revista Unifenas Alfenas*, 5:21-26, 1999.
- ▶ SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.; BERNOUX, M. *Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado*. *Acta Scientiarum Agronomy*, 31:709-717, 2009.
- ▶ STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F.; SIX, J. *Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation*. *Biogeochemistry*, 86, doi:10.1007/s10533-007- 9140-0, 2007.
- ▶ TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. *Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia*. *Soil Science*, v.163, n.3, p.190-202, 1998.
- ▶ WALKLEY, A.; BLACK, I. A. *An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid tritration method*. *Soil Science*, 37:29-38, 1934.
- ▶ XU, S. et al. *Effect of land-use conversion on ecosystem C stock and distribution in subtropical grazing lands*. *Plant and soil*, v. 399, n. 1–2, p. 233–245, 2016.
- ▶ ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J.M.; RESCK, D.V.S. *Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: soil texture and mineralogy*. *Soil Science Society of America Journal*, 71:1204-1214, 2007.

Esta publicação é um cofinanciamento entre o WWF-Brasil e a União Europeia e faz parte das ações do projeto Gestão Integrada de Paisagem Sustentável no Bioma Cerrado no Brasil e no Paraguai. O seu conteúdo é da exclusiva responsabilidade de seus autores e não reflete necessariamente as opiniões da União Europeia.

Este material faz parte de uma coletânea de três estudos desenvolvidos pelo GTPastagens e que mostram ser possível intensificar e escalonar a reabilitação das pastagens degradadas no Cerrado, melhorar seu rendimento econômico e diminuir o impacto da produção, ao mesmo tempo que reduz a pressão por novos desmatamentos.

#### Realização

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAFLORA) – Iniciativa de Clima e Cadeias Agropecuárias  
WWF Brasil

#### Redação

Ciniro Costa Junior

#### Revisão

Marina Piatto e Renata Fragoso Potenza

#### Ficha Catalográfica

Potencial de captura de carbono no solo a partir da reabilitação de pastagens degradadas no Cerrado.  
Ciniro Costa Junior Piracicaba/SP Imaflora, 2020 83p.

1. Carbono no solo 2. Pastagem degradada 3. Cerrado  
4. Estoque de carbono 5. Métodos de Amostragem

#### WWF-BRASIL

**Diretor Executivo do WWF-Brasil**  
Maurício Voivodic

**Diretor de Conservação e Restauração**  
Edegar de Oliveira Rocha

**Coordenadora de Projetos**  
Carolina Siqueira

**Analista de Conservação**  
Laís Ernesto Cunha

**Analista de Engajamento**  
Maria Fernanda Maia

**Projeto Gráfico e Design Editorial**  
Laboota

## SOBRE O GTPASTAGENS

Um grupo de trabalho multi stakeholder que integra membros da academia, da sociedade civil e do setor privado com um só foco: reabilitação das pastagens degradadas no Cerrado.

