

VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM SISTEMA SILVIPASTORIL BIOFERTILIZADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA *

*SOIL CARBON STOCK VALUATION IN SILVOPASTORAL SYSTEM BIOFERTILIZED WITH SWINE WASTEWATER**

EVALUACIÓN DEL CARBONO ACUMULADO EN SUELO EN SISTEMA SILVOPASTORIL BIOFERTILIZADO CON AGUA RESIDUAL DE LA PORCICULTURA

Giulia Faria Shimamoto¹
Fabrício Pelizer de Almeida²
Adriane de Andrade Silva³

Resumo

O aquecimento global potencializado pelas emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), pode ocasionar danos incalculáveis à biodiversidade. Nesse contexto, o desenvolvimento de projetos que visem o estoque e a manutenção do carbono no solo são estratégias interessantes para reduzir a emissão do CO₂ na atmosfera. Este estudo teve como objetivo quantificar o estoque de CO₂ equivalente (Est CO₂eq) no solo em áreas de pastagem solteira e de sistemas silvipastoris biofertilizadas com água residuária da suinocultura, para estimar sua valoração no mercado de créditos de carbono e propor dois cenários para sua comercialização: 1) a venda anual do Est CO₂eq e 2) a venda do Est CO₂eq acumulado ao longo dos três anos estudados. De acordo com os teores de Est CO₂eq — e as cotações cambiais e dos créditos de carbono nas datas 01/06/2016, 01/06/2017 e 01/06/2018 —, o montante financeiro recebido caso a *commodity* fosse comercializada anualmente seria de R\$ 251,00, R\$ 142,59 e R\$ 540,28, respectivamente. A venda do Est CO₂eq acumulado resultaria no faturamento de R\$ 1.732,52. Tais dados reforçam a viabilidade do comércio dos créditos de carbono. Esta pesquisa, portanto, pode subsidiar a avaliação de projetos ambientais que combinem técnicas de biofertilização e sistemas agroflorestais, bem como contribuir para o cumprimento das metas de redução de emissão de CO₂.

Palavras-chave: mudanças climáticas; sequestro de carbono; mercado de carbono.

Abstract

Global warming powered by greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide (CO₂), can cause incalculable damage to biodiversity. Thus, the development of projects to stock and maintain carbon in the soil are interesting strategies to reduce CO₂ emission into the atmosphere. This study aimed to quantify the CO₂ equivalent stock (Est CO₂eq) in the soil in single pasture areas and silvipastoral systems biofertilized with swine wastewater, estimate its valuation in the carbon credit market and propose two scenarios for its commercialization: the annual sale of Est CO₂eq and the sale of Est CO₂eq accumulated over the three years studied. According to the levels of Est CO₂eq, with the Exchange rates and carbon credits, for the dates 2016-01-06, 2017-01-06 and 2018-01-06, the financial amount received, in case the commodity was traded annually, it would be R\$ 251,00, R\$ 142,59 and R\$ 540,28, respectively. While the sale of the accumulated Est CO₂eq would result in a turnover of R\$ 1.732,52. Such data reinforce the viability of the carbon credit trade. This research, therefore, can support environmental projects evaluation that combine biofertilization techniques and agroforestry systems, as well as enable the achievement of CO₂ emission reduction goals.

Keywords: climate change; carbon sequestration; carbon market.

* Artigo parcialmente apresentado no 16º Congresso Nacional de Meio Ambiente - Poços de Caldas - 2019.

¹ Mestre em Qualidade Ambiental pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: giulia.shimamoto@gmail.com

² Professor-Doutor no Instituto de Tecnologia da Universidade de Uberaba (Uniube). E-mail: fabricio.almeida@uniube.br

³ Professora-Doutora no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: adriane@ufu.br

Resumen

El calentamiento global provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), puede producir graves daños a la biodiversidad. En ese contexto, el desarrollo de proyectos para almacenar y mantener el carbono en el suelo son estrategias interesantes para reducir la emisión de CO₂ en la atmósfera. Este estudio tiene el objetivo de cuantificar el acumulado de CO₂ equivalente (Est CO₂eq) en suelo en áreas de pasturas asociadas y de sistemas silvopastoriles biofertilizados con agua residual de la porcicultura, para estimular su valoración en el mercado de crédito de carbono y proponer dos escenarios para su comercialización: 1) la venta anual de Est CO₂eq y 2) la venta de Est CO₂eq acumulado a lo largo de los tres años estudiados. Según los índices de Est CO₂eq — y las tasas de cambio y los créditos de carbono en los días 01/06/2016, 01/06/2017 y 01/06/2018 — el monto financiero recibido si la *commodity* hubiese sido comercializada anualmente sería de R\$ 251,00, R\$ 142,59 y R\$ 540,28, respectivamente. La venta de Est CO₂eq acumulado resultaría en la facturación de R\$ 1.732,52. Tales datos refuerzan la viabilidad del comercio de los créditos de carbono. En consecuencia, esta investigación puede fundamentar la evaluación de proyectos ambientales que combinen técnicas de biofertilización y sistemas agroforestales, así como contribuir al cumplimiento de las metas de reducción de emisión de CO₂.

Palabras-clave: cambios climáticos; secuestro de carbono, mercado de carbono.

1 Introdução

Em meados dos anos 1990, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sinalizava que as ações antrópicas eram as principais causadoras do aumento da temperatura do planeta (IPCC, 1990), principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa (GEEs). A problemática da emissão de GEEs justifica-se pela grande concentração destes na atmosfera, que intensifica o aumento da temperatura média da Terra, provoca mudanças climáticas e desequilíbrios ambientais (RANSON; STAVINS, 2016).

Nesse cenário de aquecimento gradual, estudos científicos demonstram que as mudanças climáticas interferem na variabilidade de precipitação, temperatura e demais fenômenos climáticos (SENEVIRATNE *et al.*, 2012), assim como na severidade, frequência e natureza de eventos extremos (STOCKER, 2013). Ocorrências de secas mais fortes e duradouras, assim como precipitação intensa, projetadas por modelos climáticos atualizados (FISHER; KNUTTI, 2014), chamam atenção por afetarem drasticamente diversos sistemas biológicos (HANSEN *et al.*, 2006).

Schwalm *et al.* (2012) ressaltam que as alterações climáticas estão fortemente associadas ao ciclo do carbono. Neste sentido, Frank *et al.* (2010) esclarecem que o sistema climático é influenciado pela adição desse elemento no ecossistema terrestre e por sua perda para a superfície atmosférica.

Segundo o *United States Department of Energy* (2017), a evolução das emissões globais de carbono indica um padrão de crescimento acelerado entre 1900 e 2010, partindo de concentrações próximas a zero a valores próximos a 10.000 Tg CO₂, em 2010. O crescimento vertiginoso entre 2010 e 2016 sinaliza um cenário ainda mais catastrófico, cujas emissões atingem valores superiores a 35.000 Tg CO₂.

O Brasil tem arcabouço legislativo robusto para gerenciar satisfatoriamente suas emissões de CO₂. Neste sentido, destacam-se a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (BRASIL, 2009), o Novo Código Florestal (BRASIL, 2012) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), as quais, se fossem efetivamente aplicadas, reduziriam drasticamente as emissões do país. Além disto, conservar-se-iam créditos de carbono em proporção gigantesca devido às extensas áreas de florestas nativas e plantadas, e à biodiversidade de algas marinhas (LE MOS; VITAL; PINTO, 2010; SOARES FILHO, 2013).

A comercialização de créditos de carbono proposta pelo Protocolo de Quioto e os esquemas de *cap and trade* são alternativas eficazes de redução das emissões de CO₂, e estimulam a inversão da proporcionalidade direta entre o PIB e as emissões de GEEs (VITAL, 2018). Nos países europeus, esses sistemas de mercado sugerem que projetos ambientais são financeiramente vantajosos e auxiliam o desenvolvimento de técnicas, e tecnologias, que contribuam para o desenvolvimento da nação (WORLD BANK, 2014).

Segundo a Conferência das Partes Signatárias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2019), a emissão de CO₂ é medida em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), de modo que um crédito de carbono corresponde a uma tonelada de CO₂eq (tCO₂eq). Vital (2018) explica que o CO₂eq é um parâmetro de proporcionalidade entre os GEEs e o CO₂. Para esta equivalência, considera-se o potencial de aquecimento global dos GEEs e calcula-se a concentração de CO₂ emitida caso todos os GEEs lançados se comportassem como o CO₂. O CO₂eq é uma *commodity* que sofre com as flutuações do mercado de carbono. O faturamento obtido com sua comercialização resulta da multiplicação entre o estoque de CO₂ e seu valor de mercado (FAJARDO; TIMOFEICZYK JÚNIOR, 2015).

A política de pagamento por serviços ambientais é um mecanismo que harmoniza questões econômicas e ambientais (ARAKAKI, 2014), emprega os princípios da sustentabilidade e favorece o cumprimento das metas de redução de emissão de CO₂. Oliveira *et al.* (2018) acrescentam que a valoração desses serviços é primordial para estipular o valor monetário a ser pago.

Fajardo e Timofeiczky Júnior (2015) esclarecem que o sequestro florestal de carbono é um serviço ecossistêmico com grande potencial de mitigação das mudanças climáticas, por amenizar o efeito estufa ao reduzir o acúmulo de CO₂ na atmosfera. O acordo estabelecido na UNFCCC (2007) prevê que a comercialização do carbono sequestrado requer validação do projeto ambiental pelos órgãos competentes, além de quantificação da biomassa florestal e do estoque de carbono no solo (FERNANDES *et al.*, 2008).

Os estudos destinados à temática sequestro de carbono e comercialização de créditos de carbono são amparados pela PNMC, que preconiza o desenvolvimento de pesquisas e processos direcionados à redução de emissões antrópicas, assim como para fortalecimento das remoções por sumidouros de GEEs. A PNMC também delibera sobre o estímulo ao desenvolvimento do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) (BRASIL, 2009).

Em tal contexto, a pesquisa realizada pretende avaliar os teores de carbono orgânico no solo e de estoque de CO₂eq após três anos de aplicações de diferentes dosagens de água residuária da suinocultura (ARS), em áreas de pastagem e de sistemas silvipastoris, bem como estimar a valoração desse estoque no mercado de créditos de carbono.

2 Metodologia

2.1 Caracterização da área experimental

Os estudos ocorreram na Fazenda Bonsucesso, localizada no município de Uberlândia – MG, na rodovia Uberlândia – Campo Florido (MGC – 455) km 20, situada sob as coordenadas geográficas 19° 06' 03,19"S e 48° 22' 07,93"W, com altitude média de 820 m em relação ao nível do mar. Segundo o sistema de classificação de Köppen (1918), o clima da região é do tipo Aw, tropical típico, apresenta excesso de chuvas no verão e moderado déficit hídrico no inverno, com média de precipitação de 1600 mm por ano.

O experimento foi conduzido sob área de cerrado estabelecida em pastagem com a espécie *Urochloa decumbens*, em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, com horizonte A moderado e de textura arenosa, classificado de acordo com as normas da Embrapa (DOS SANTOS *et al.*, 2018). Os tratamentos consistem na aplicação da ARS tratada nas doses 0, 200, 400, 600 e 800 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, com aplicações parceladas ao longo dos anos 2015, 2016 e 2017.

A ARS aplicada é proveniente da própria Fazenda Bonsucesso, que contempla um sistema de confinamento para 6 mil animais e produz em média 110 m³.dia⁻¹ desse efluente, tratado em biodigestor e lagoa de estabilização.

Três áreas experimentais foram submetidas à aplicação de ARS nesta pesquisa, quais sejam, área de Pastagem Solteira (PS), área LS (Sistema Silvipastoril em linha simples), representada por linha simples da espécie *Corymbia citriodora* em consórcio com pastagem e a área de Sistema Silvipastoril em linha dupla (LD), que abrange linha dupla de *Corymbia citriodora* e pastagem.

2.2 Análise físico-química do solo

Ao fim das aplicações anuais da ARS foram coletadas amostras de solo em duas profundidades 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Para a caracterização química do solo, secaram-se as amostras em estufa de circulação forçada de ar por 48 horas, após o que foram trituradas e peneiradas (DONAGEMA *et al.*, 2011). A matéria orgânica do solo (MOS) foi estimada através do Método Colorimétrico (QUAGGIO; RAIJ, 1979). Obteve-se o carbono orgânico total (CO) através da divisão do teor de MOS por 1,724 (58% de C na MOS). A densidade do solo (Ds) foi estimada por meio de anéis volumétricos, seguindo os procedimentos estipulados pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (DONAGEMA *et al.*, 2011).

2.3 Quantificação e valoração do estoque de carbono

O dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) foi estimado através da multiplicação do teor de CO por 3,67, valor definido pela razão entre a massa molecular do dióxido de carbono (44 g.mol⁻¹) e a massa atômica do carbono (12 u) (LACERDA *et al.*, 2009). Para obtenção do estoque de CO₂eq (Est CO₂eq), utilizou-se o modelo de Veldkamp (1994), expresso na Equação 1.

$$\text{Est CO}_2\text{eq} = \left[\frac{\text{CO}_2\text{eq.Ds.e}}{10} \right] \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

Est CO₂eq representa o estoque de dióxido de carbono equivalente (t.ha⁻¹); CO₂eq indica o teor de dióxido de carbono equivalente (g.kg⁻¹); Ds corresponde a densidade do solo (kg.dm⁻³); e indica a espessura da camada analisada (cm); e 10 representa o fator de correção das unidades da equação.

Com base nos valores de Est CO₂eq, determinaram-se os faturamentos anuais e o acumulado em função das aplicações de ARS, obtidos pela Fazenda Bonsucesso para o caso de comercialização dos créditos de carbono. Determinou-se 01/06 como data-controle para valoração dos créditos de carbono, de modo que o efeito de cada aplicação abrangesse um ano. Sob tal perspectiva, a valoração da primeira aplicação contempla o período entre 01/06/2015 e 01/06/2016, considerando o valor monetário dos créditos de carbono e as cotações cambiais em 01/06/2016. O mesmo raciocínio estende-se às aplicações posteriores, ocorridas em 2016 e 2017, respectivamente.

A Tabela 1 demonstra as cotações para as datas 01/06/2016, 01/06/2017 e 01/06/2018, de acordo com as taxas de câmbio (BCB, 2019) e o valor da *commodity* no mercado de créditos de carbono (INVESTING.COM, 2019).

Tabela 1: cotações da tCO₂eq⁻¹ em 01/06/2016, 01/06/2017 e 01/06/2018, segundo o Banco Central do Brasil (2019) e o mercado de créditos de carbono (2019)

Cotação	01/06/2016	01/06/2017	01/06/2018
€.tCO ₂ eq ⁻¹	6,12	5,19	15,37
US\$.tCO ₂ eq ⁻¹	6,8324	5,8211	17,9537
R\$.tCO ₂ eq ⁻¹	24,6827	18,8062	67,1702

Fonte: os autores, 2019.

3 Resultados e Discussão

3.1 Estoque de carbono

A Tabela 2 demonstra que, em todas as áreas experimentais, na camada 0,0-0,2 m de profundidade, as parcelas que não receberam a ARS apresentaram teores superiores de CO após a primeira aplicação do biofertilizante. Os dados da segunda aplicação demonstram maior eficiência da dose 400 m³.ha⁻¹ para as áreas LS e LD, enquanto o tratamento testemunha continua apresentando teores elevados para a PS. Após a terceira aplicação, os teores de CO foram superiores com a dose 600 m³.ha⁻¹ na área LS e nas parcelas que não receberam a ARS, nas áreas PS e LD.

Tabela 2: teores de carbono orgânico e de estoque de dióxido de carbono equivalente por aplicação na camada 0,0-0,2 m

Área	Dose m ³ .ha ⁻¹	CO (g.kg ⁻¹)			Est CO ₂ eq (t.ha ⁻¹)		
		1 ^a Aplicação	2 ^a Aplicação	3 ^a Aplicação	1 ^a Aplicação	2 ^a Aplicação	3 ^a Aplicação
PS	0	5,05	6,38	6,53	59,17	74,77	76,46
	200	4,50	4,79	5,66	51,85	55,13	65,16
	400	4,60	5,22	5,77	52,23	59,27	65,46
	600	4,88	4,50	5,75	54,73	50,47	64,60
	800	4,79	5,22	5,89	54,85	59,74	67,37
LS	0	12,18	6,82	5,08	137,82	77,15	57,45
	200	10,43	6,09	5,93	120,11	70,17	68,30
	400	10,28	7,40	5,95	119,93	86,27	69,36
	600	10,53	5,51	7,40	123,45	64,63	86,73
	800	10,56	4,93	7,36	123,75	57,79	86,27
LD	0	8,43	7,25	6,24	93,40	80,38	69,13
	200	7,83	9,43	5,51	90,26	108,72	63,56
	400	7,76	12,04	5,59	87,51	135,80	63,02
	600	7,82	5,51	5,82	90,42	63,71	67,27
	800	7,60	6,09	5,82	87,02	69,74	66,68

Total	117,24	97,18	90,30	1.346,50	1.113,74	1.036,82
-------	--------	-------	-------	----------	----------	----------

Fonte: os autores, 2019.

É interessante considerar, na área PS, os crescentes teores de CO ao longo das aplicações, com exceção da dose $600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, que decresceu entre a primeira e a segunda aplicações. Nesta área, em todos os anos, o tratamento testemunha destacou-se em relação aos demais. Constatou-se decréscimo dos teores de CO também para as doses 0, 200 e $400 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ na área LS, e para as doses 0 e $800 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ na área LD, ao longo das três aplicações de ARS.

Entretanto, verifica-se acréscimo do teor de CO entre a segunda e a terceira aplicações nas doses 600 e $800 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, na área LS, e na dose $600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, na área LD. O acréscimo ocorreu também entre 2015 e 2016, e o decréscimo, entre 2016 e 2017, para as dosagens 200 e $400 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ na área LD.

A Tabela 3 demonstra que a concentração de CO, na camada 0,2-0,4 m de profundidade, elevou-se ao longo das aplicações nas doses 200 e $800 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ na área PS. Em todos os tratamentos da área LS, o teor de CO reduziu após a segunda aplicação, mas ascendeu após a terceira. O mesmo comportamento se observou para as dosagens 0, 200, 600 e $800 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ na área LD, e para as doses 0, 400 e $600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, na PS.

Tabela 3: teores de carbono orgânico e de estoque de dióxido de carbono equivalente por aplicação na camada 0,2-0,4 m

Área	Dose $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$	CO ($\text{g}.\text{kg}^{-1}$)			Est CO_2eq ($\text{t}.\text{ha}^{-1}$)		
		1 ^a Aplicação	2 ^a Aplicação	3 ^a Aplicação	1 ^a Aplicação	2 ^a Aplicação	3 ^a Aplicação
PS	0	4,50	4,21	5,66	51,85	48,45	65,16
	200	4,63	4,79	6,96	54,67	56,46	82,13
	400	4,63	4,50	7,25	54,67	53,04	85,55
	600	4,04	3,34	6,75	47,17	38,93	78,74
	800	4,48	4,50	6,98	52,04	52,26	81,12
LS	0	10,43	4,79	5,95	120,11	55,13	68,50
	200	12,45	5,51	7,40	139,45	61,72	82,84
	400	12,24	5,51	7,36	138,87	62,53	83,53
	600	12,40	4,79	7,60	139,31	53,78	85,45
	800	12,75	4,79	8,06	143,47	53,86	90,69
LD	0	7,83	4,50	5,51	90,26	51,85	63,56
	200	7,70	5,22	7,98	89,93	60,97	93,15
	400	7,60	9,72	7,80	88,54	113,19	90,83
	600	7,75	5,95	7,43	88,31	67,75	84,60
	800	8,09	3,77	8,12	93,70	43,68	94,08
Total		121,52	75,89	106,81	1.392,35	873,60	1.229,93

Fonte: os autores, 2019.

Os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3 demonstram que, na camada 0,0-0,4 m de profundidade, após a terceira aplicação do biofertilizante, as áreas LS e LD apresentaram teores de CO inferiores aos da primeira aplicação. Na área os, observaram-se concentrações de CO crescentes ao longo das aplicações, com exceção da dose 600 m³.ha⁻¹, que decresceu entre a primeira e a segunda aplicações. Constata-se, portanto, que os efeitos da primeira aplicação possibilitaram maiores teores de CO, conseqüentemente, de Est CO₂eq, quando comparados às demais aplicações.

Vale considerar que as áreas analisadas foram por muitos anos ocupadas por pastagem degradada. Este fator, somado ao reduzido percentual de argila no solo, entre 15 e 35%, contribuem para a degradação da MOS. Desta forma, justificam-se os baixos teores de MOS, segundo a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999), na maioria dos tratamentos e em ambas as profundidades.

Os baixos teores de MOS observados após as três aplicações do biofertilizante se justificam pelas baixas concentrações de CO na ARS e pela rápida degradação da MOS, porquanto se intensifica a atividade microbiana no solo. Stevenson e Cole (1999) explicam que o efeito da aplicação da ARS é denominado *priming*, no qual a decomposição da MOS é proporcionada pelo acréscimo de agentes microbianos, resultado da inserção de um material energético ao solo.

As três aplicações da ARS não proporcionaram expressivos incrementos de MOS, o que também foi constatado por Caovilla *et al.* (2010) no estudo do efeito da aplicação da ARS nas concentrações 25, 50 e 75%, em Latossolo Vermelho distroférico típico, cultivado com soja. Outros estudos ratificam tal resultado, como o de Homen *et al.* (2014), ao testarem as doses 50, 100 e 150 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ de ARS em área de pastagem de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk — e a pesquisa de Prior *et al.* (2015), que avaliaram as doses 0, 112,5, 225, 337,5 e 450 m³.ha⁻¹ de ARS em Latossolo Vermelho distroférico típico, cultivado com milho.

3.2 Valoração do estoque de carbono

A Tabela 4 demonstra o valor monetário do Est CO₂eq caso os créditos de carbono fossem comercializados nas datas 01/06/2016, 01/06/2017 e 01/06/2018.

Tabela 4: valoração do estoque de dióxido de carbono equivalente da Fazenda Bonsucesso na camada 0,0-0,4 m de profundidade

Área	Dose	Parcela	Valoração por Parcela (R\$)
------	------	---------	-----------------------------

	m ³ .ha ⁻¹	m ²	01/06/2016	01/06/2017	01/06/2018
PS	0	16	4,40	3,71	15,22
	200	16	4,21	3,36	15,83
	400	16	4,22	3,38	16,23
	600	16	4,04	2,69	15,40
	800	16	4,23	3,37	15,96
LS	0	30	19,12	7,46	25,38
	200	30	19,25	7,44	30,45
	400	30	19,19	8,40	30,81
	600	30	19,49	6,68	34,70
	800	30	19,82	6,30	35,66
LD	0	60	27,19	14,92	53,48
	200	60	26,67	19,15	63,16
	400	60	26,03	28,09	62,00
	600	60	26,43	14,83	61,21
	800	60	26,71	12,80	64,79
Total		530	251	142,59	540,28

Fonte: os autores, 2019.

Entre 2016 e 2017, o impacto das desvalorizações da *commodity* e do dólar comercial, (Tabela 1) combinado ao decréscimo dos teores de CO em diversos tratamentos nas áreas experimentais, resultaram na desvalorização dos créditos de carbono. Em compensação, a cotação de CO₂eq no mercado elevou-se satisfatoriamente em 01/06/2018, quando uma tCO₂eq alcançou €15,37 (INVESTING.COM, 2019). Vale considerar também a valorização do euro, do dólar comercial e do real, bem como o aumento dos teores de CO, principalmente na camada 0,2-0,4 m de profundidade, entre a segunda e a terceira aplicação de ARS.

As diferentes extensões das áreas experimentais provocam discrepância sobre o seu valor monetário. Portanto, é preciso padronizar a extensão das áreas para comparar a valoração do Est CO₂eq. Sendo assim, ao considerar todos os tratamentos, a camada 0,0-0,4 m de profundidade e área igual a um hectare, alcançam-se para PS, LS e LD, R\$13.187,09, R\$32.290,14 e R\$22.171,64, respectivamente, em 2106. Para a comercialização em 01/06/2017, os créditos de carbono para PS, LS e LD, valem, respectivamente, R\$10.315,50, R\$12.092,95 e R\$14.965,94. Em 2018, esses valores são, respectivamente, R\$49.151,25, R\$52.333,53 e R\$50.772,58, para PS, LS e LD.

Nesse contexto, os maiores retornos financeiros provêm das áreas em sistema silvipastoril. Após a primeira e a terceira aplicações do biofertilizante, a área LS destacou-se

com os teores de CO₂e, conseqüentemente, com o valor dos créditos de carbono. A área LD apresentou maior valor de mercado após a segunda aplicação.

Diante do aquecimento do mercado de carbono, em 2018, estimou-se a valoração do Est CO₂eq acumulado no solo após as três sucessivas aplicações de ARS. Caso sua comercialização ocorresse em 01/06/2018, seria ainda mais rentável para os proprietários da Fazenda Bonsucesso, pois o valor total obtido dos créditos de carbono, considerando os cinco tratamentos e a camada 0,0-0,4 m, alcança R\$1.732,52, valor superior à soma das vendas anuais (R\$933,87), como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: valoração do estoque de dióxido equivalente acumulado ao longo das três aplicações de ARS na camada 0,0-0,4 m de profundidade

Área	Dose m ³ .ha ⁻¹	Est CO ₂ eq Acumulado t.ha ⁻¹	Valoração por Parcela R\$
PS	0	375,86	40,39
	200	365,40	39,27
	400	370,22	39,79
	600	334,64	35,96
	800	367,38	39,48
LS	0	516,16	104,02
	200	542,59	109,34
	400	560,49	112,94
	600	553,35	111,51
	800	555,83	112,01
LD	0	448,58	180,79
	200	506,59	204,17
	400	578,89	233,30
	600	462,06	186,22
	800	454,90	183,33
Total		6.992,94	1.732,52

Fonte: os autores, 2019.

Caso fossem considerados os Est CO₂eq acumulados, as áreas experimentais iguais a um hectare e a comercialização em 2018, os créditos de carbono valeriam R\$121.813,10, R\$183.268,43 e R\$165.635,42 para PS, LS e LD, respectivamente. Nesse cenário, LS mantém seu destaque como a área que mais estoca CO₂e, e recebe, por isto, o maior pagamento. Destaca-se ainda que o valor pago pelo estoque acumulado é substancialmente superior ao que se pagaria se as vendas fossem anuais.

Percebe-se que a valoração estimada do estoque de carbono no solo demonstra a viabilidade de retorno do projeto, principalmente através da comercialização do estoque de carbono acumulado ao longo dos três anos de aplicação da ARS. Fernandes e Finco (2014) validam a rentabilidade do pagamento por esse serviço ambiental, e comprovam que a estratégia

de compra e venda de crédito de carbono é uma ferramenta significativa, aplicável a sistemas agroflorestais. No entanto, os mesmos autores ressaltam que sua efetividade está relacionada aos valores atribuídos aos Certificados de Emissões Reduzidas (CERs).

4 Conclusões

A área experimental da Fazenda Bonsucesso apresenta grande potencial de estoque de carbono no solo, sequestrando 238,76 t C.ha⁻¹, 172,36 t C.ha⁻¹, 197,11 t C.ha⁻¹, o que corresponde a 2.738,85 t CO₂eq.ha⁻¹, 1.987,34 t CO₂eq.ha⁻¹ e 2.266,75 t CO₂eq.ha⁻¹ em 2015, 2016 e 2017, respectivamente. O valor monetário desse estoque assegura o faturamento de R\$251, R\$142,59 e R\$540,28, para as datas 01/06/2016, 01/06/2017 e 01/06/2018, respectivamente.

A comercialização do Est CO₂eq acumulado ao fim das três aplicações de ARS é mais vantajosa que as vendas anuais, visto que a valorização da *commodity* e das taxas cambiais apresentam melhores cotações no mercado. O aquecimento do mercado de créditos de carbono entre os anos analisados fortalece a rentabilidade de investimentos em projetos ambientais sustentáveis.

Referências

ARAKAKI, K. K. **Valoração econômica dos serviços ambientais prestados pelo sistema de integração lavoura-pecuária-floresta: uma análise de experimento de longa duração da Embrapa gado de corte.** 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL - BCB. Cotações e boletins. Disponível em: <https://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?frame=1>. Acesso em: 9 abr. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em: 23 de abr. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 23 abr. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá

outras providências. Brasília: Presidência da República, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/11265_1.htm. Acesso em: 23 abr. 2019.

CAOVILLA, F. A.; SAMPAIO, S. C.; SMANHOTTO, A.; NÓBREGA, L. H.; de QUEIROZ, M. M. Características químicas de solo cultivado com soja e irrigado com água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 7, p. 692-697, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000700002

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 4. ed. Lavras: CFSEMG, 1989. 176 p.

CRÉDITO CARBONO FUTUROS. 2019. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 9 abr. 2019.

DONAGEMA, G. K.; de CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/990374/1/ManualdeMtodosdeAnilisedeSolo.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

DOS SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos (INFOTECA-E)**. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 10 abr. 2019.

FAJARDO, A. M. P.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R. Avaliação financeira do sequestro de carbono na Serra de Baturité, Brasil, 2012. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 3, p. 391-399, 2015. DOI 10.1590/2179-8087.061413

FERNANDES, A.; DE SALIS, S. M.; FERNANDES, F.; CRISPIM, S. **Estoques de carbono do estrato arbóreo de cerrados no pantanal da Nhecolândia**. Corumbá: Embrapa Pantanal-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/792560/1/COT68.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

FERNANDES, M. da S.; FINCO, M. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária e políticas de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 2, p. 182-190, 2014. DOI 10.1590/S1983-40632014000200004

FISHER, E. M.; KNUTTI, R. Detection of spatially aggregated changes in temperature and precipitation extremes. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 547-554, 2014. DOI: 10.1002/2013GL058499

FRANK, D. C.; ESPER, J.; RAIBLE, C. C.; BÜNTGEN, U.; TROUET, V.; STOCKER, B.; JOOS, F. Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. **Nature**, London, v. 463, n. 7280, p. 527-530, 2010. DOI 10.1038/nature08769

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; LO, K.; LEA, D. W.; MEDINA-ELIZADE, M. Global temperature change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 103, n. 39, p. 14288-14293, 2006. DOI 10.1073/pnas.0606291103

HOMEN, B. G. C.; ALMEIDA NETO, O. B.; CONDÉ, M. S.; SILVA, M. D.; FERREIRA, I. M. Efeito do uso prolongado de água residuária de suinocultura sobre as propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Científica**, Dracena, v. 42, n. 3, p. 299-309, 2014. DOI 10.15361/1984-5529.2014v42n3p299-309

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Disponível em: https://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/ryan-lab/pubs/Melillo_et_al_1990_IPCC1_WG1.PDF. Acesso em: 10 abr. 2019.

LACERDA, J. S.; COUTO, H. D.; HIROTA, M. M.; PASISHNYK, N.; POLIZEL, J. L. Estimativa da biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas. **Emendabis Mensvram Silvarvm**, Piracicaba, v. 5, p. 1-23, nov. 2009.

LEMOS, A. L.; VITAL, M. H.; PINTO, M. A. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 32, p. 153-192, set. 2010. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2023>. Acesso em: 20 abr. 2019.

OLIVEIRA, G. A. de; da SILVA, F. F.; NASCIMENTO, J.; AGOSTINHO, P.; PADOVAN, M. Valoração econômica de serviços ambientais em sistemas agroflorestais biodiversos. **Cadernos de Agroecologia**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 10-10, 2018. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1103606/1/ID_36784.pdf. Acesso em: 10 abr. 2019.

PRIOR, M.; SAMPAIO, S. C.; NÓBREGA, L. H. P.; DIETER, J.; COSTAS, M. S. S. de M. Estudo da associação de água residuária de suinocultura e adubação mineral na cultura do milho e no solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticahal, v. 35, n. 4, p. 744-755, 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p744-755/2015.

QUAGGIO, J. A.; VAN RAIJ, B. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 1979.

RANSON, M.; STAVINS, R. N. Linkage of greenhouse gas emissions trading systems: Learning from experience. **Climate Policy**, v. 16, n. 3, p. 284-300, 2016. DOI: 10.1080/14693062.2014.997658.

SCHWALM, C. R. *et al.* Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America. **Nature Geoscience**, [S. l.], v. 5, n. 8, p. 551, 2012. DOI 10.1038/ngeo1529.

SENEVIRATNE, S. I. *et al.* Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *In*: MANAGING the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 109-230. DOI 10.7916/d8-6nbt-s431.

SOARES-FILHO, B. S. **Impacto da revisão do código florestal**: como viabilizar o grande desafio. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos, 2013.

STOCKER, T. F. The closing door of climate targets. **Science**, [S. l.], v. 339, n. 6117, p. 280-282, 2013.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Reducing emissions from deforestation in developing countries**: approaches to stimulate action, conferece of the parties, Bali, 3 dec. To 14 dec., 2007. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbsta/eng/l23a01r01.pdf>. Acesso em 15: abr. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. United Nations: [S. l.], 1988. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **CDIAC – Carbon Dioxide Information Analysis Center**. Oak Ridge National Laboratory. 2017. Disponível em: http://cdiac.ornl.gov/CO2_Emission/timeseries/national. Acesso em: 10 abr. 2019.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 58, n.1, p.175-180, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Set.**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167-244, set. 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16043/2/PRArt214085_Aquecimento%20global_compl_P.pdf. Acesso em: 10 abr. 2019.

WORLD BANK. **State and trends of carbon markets 2014**. Washington D.C., 2014. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/505431468148506727/pdf/882840AR0REPLA00EPI2102680Box385232.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2019.