

# Uma abordagem para suporte à decisão no processo de geração de créditos de carbono em propriedades rurais

Luiz Santos, José Maria N. David, Regina Braga

Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)  
Caixa Postal 20.010 – 36036-900 – Juiz de Fora – MG – Brazil

fernando.santos@estudante.ufjf.br, jose.david@ufjf.br,  
regina.braga@ufjf.br

**Abstract.** *Global warming has been a topic of great concern in recent years. It is believed to be mainly related to the emission of greenhouse gases. In Brazil, the land use change was responsible for the largest share of emissions in 2021. The balanced use of soil can enable the country, in addition to mitigating emissions, to generate carbon credits with a potential economic return. For this, there is a diversity of data available that, integrated with the context of an agricultural Measurement, Reporting and Verification (MRV) system, may contribute to decision support for the process of generating carbon credits. This study presents an approach for syntactic and semantic integration of heterogeneous databases related to land use and animal husbandry in Brazilian rural properties. As a result, it is possible to provide strategic information to offer alternatives for land cultivation with a focus on mitigating the emission of greenhouse gases and the stock of carbon in the soil. With this, support for generating and certifying credits is made possible.*

**Resumo.** *O aquecimento global têm sido um tema de grande preocupação nos últimos anos. Acredita-se estar relacionado, principalmente, com a emissão dos gases de efeito estufa. No Brasil, a mudança no uso do solo foi responsável pela maior fatia das emissões no ano de 2021. O uso equilibrado da terra pode possibilitar ao país, além de mitigar as emissões, gerar créditos de carbono com um potencial retorno econômico. Para isso, existe uma diversidade de dados disponíveis que, integrados no contexto de um sistema de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) agropecuário, poderão contribuir com o suporte à decisão para o processo de geração de créditos de carbono. Este estudo apresenta uma abordagem para integração sintática e semântica de bases de dados heterogêneas relacionadas ao uso do solo e à criação de animais nas propriedades rurais brasileiras. Como resultado, identificamos ser possível prover informações estratégicas para oferecer alternativas de cultivo da terra com foco na mitigação da emissão de gases de efeito estufa e no estoque de carbono no solo. Com isso, o suporte à geração e à certificação dos créditos é viabilizado.*

## 1. Introdução

O aquecimento global tornou-se um tema de preocupação na sociedade e um foco de pesquisa na comunidade científica [Lu et al. 2022]. Seus impactos estão aumentando a cada ano [Letcher 2021]. Acredita-se que a causa está relacionada ao aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE) [Letcher 2021] [Lu et al. 2022].

Segundo o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC), órgão ligado à Organização das Nações Unidas, cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer outra que a precedeu. A estimativa é que as temperaturas continuem elevando-se ao longo do século XXI, caso ações de contenção do problema não sejam adotadas em larga escala [Mudança do Clima 2021].

O Brasil, que ocupa o quinto lugar entre os maiores poluidores climáticos, com cerca de 3,2% do total mundial, ficando atrás apenas de China, EUA, Rússia e Índia [Observatório do Clima 2021], estabeleceu o compromisso da neutralização de 100% das emissões de gases de efeito estufa na forma da Estratégia Nacional de Longo Prazo [PL 6.539/2019]. O Observatório do Clima (2021) aponta que a mudança no uso da terra, como por exemplo, a derrubada de árvores para atividade pecuária, foi responsável pela maior fatia das emissões em 2021: 46% do total bruto. Além de ações para conter o desmatamento, é preciso avançar nos cuidados com o uso do solo e com a pecuária, na busca e implementação de soluções que equilibrem a vocação do agronegócio com o desenvolvimento sustentável.

Dentre as alternativas para acelerar a transição climática, o mercado de carbono tem ganhado crescente atenção nos anos recentes [Vargas et al. 2022a]. As expectativas internacionais são de que este mercado deve crescer muito nos próximos anos. No Brasil, as expectativas são igualmente positivas [Carlos et al. 2022], por ser um país com um grande potencial de geração a partir de soluções baseadas na natureza, que incluem atividades de conservação de florestas, reflorestamento e manejo sustentável dos solos e pastagens [BICC 2021] [Vargas et al. 2022a].

Devido à importância da atividade agropecuária na economia brasileira, que em 2021 representou 28,8% do Produto Interno Bruto (PIB) [ABN 2022], este setor é parte fundamental na estratégia de mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Apesar do grande potencial para a geração de créditos de carbono, observam-se barreiras econômicas, devido ao elevado investimento necessário [Observatório ABC 2020]. O setor agrícola é um setor complexo, com significativa diversidade de sistemas de produção que apresentam relação direta com aspectos ambientais, sociais e econômicos, não havendo solução única para enfrentar os desafios postos [Plano ABC 2012]. Além disso, a formação de preços no mercado de carbono atualmente não segue um padrão comum. O preço do crédito tende a variar segundo setores, regiões, certificações complementares ou benefícios atrelados à atividade, como o social por exemplo [Carlos et al. 2022]. Diante desse contexto, o processo para a geração e certificação tende a ser complexo, principalmente para pequenos e médios produtores rurais. No entanto, ele pode ser facilitado com a colaboração de especialistas de instituições públicas e privadas envolvidas com o tema e com a geração de conhecimento a partir de dados existentes nessas instituições somados aos disponíveis nas propriedades.

Existe uma diversidade de dados, principalmente em bases públicas, que uma vez integrados, podem gerar conhecimento, proporcionando suporte a decisões que colaborem na redução da “pegada” de carbono que, nesse contexto, pode ser entendida como a medição do total de emissões de GEE causadas direta ou indiretamente nas propriedades rurais [Ozlu et al. 2022].

Nesse sentido, este estudo propõe uma abordagem para integração sintática e semântica de bases de dados heterogêneas relacionadas aos cultivos agrícolas, gestão fundiária, estimativas de emissão e estoque de gases de efeito estufa relacionados ao uso do solo e à criação de animais. Pretende-se disponibilizar informações, cálculos e simulações

da “pegada” de carbono, oferecendo apoio à decisão por meio de formas alternativas de uso do solo, com a finalidade de gerar um balanço líquido positivo entre a emissão e o estoque de gases de efeito estufa nas propriedades rurais, possibilitando sua conversão para créditos de carbono. A proposta envolve o uso de ontologia [Shadbolt, Berners-Lee and Hall 2006], com foco na padronização e interoperabilidade de informações entre Sistemas de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) [Kim and Baumann 2022]. Além disso, utiliza proveniência [Miles et al. 2009], visando obter rastreabilidade do histórico dos dados e a confiabilidade necessária para certificação dos créditos em redes *blockchain* [UNFCCC 2017].

Considerando a possibilidade de monitoramento das ações executadas, a proposta também prevê a possibilidade da integração de dados de monitoramento de desmatamentos enviados por satélites, dados de estudos de amostras de solo, e dados capturados por sensores em animais e sensores de solo.

Como contribuição específica, este trabalho propõe uma arquitetura para desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão que possa ser integrado a um sistema de MRV agropecuário.

Este artigo está organizado nas seguintes seções, além da Introdução. A Seção 2 aborda conceitos relacionados a sistemas MRV. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a proposta. A Seção 5 descreve os resultados preliminares. A Seção 6 apresenta as limitações e a Seção 7 aborda considerações sobre a continuidade do estudo e a conclusão.

## **2. Sistemas MRV**

Os países que desejam obter o reconhecimento de seus resultados com a Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento, Degradação Florestal e Aumento dos Estoques de Carbono, conhecido pelo acrônimo REDD+, devem passar pelo processo de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), definido no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) [Holloway and Giandomenico 2009].

Um sistema de MRV é composto por um conjunto de processos e procedimentos por meio dos quais as informações relacionadas a emissões de GEE são fornecidas, avaliadas e verificadas visando determinar “se, como e quanto” as partes envolvidas cumpriram efetivamente suas obrigações [Wemaere 2012]. A medição é necessária para identificar tendências de emissões e determinar onde concentrar os esforços, enquanto relatórios e verificações são importantes para garantir a transparência, boa governança, responsabilidade e credibilidade dos resultados [Singh et al. 2016].

Dentre os sistemas de MRV públicos, destacam-se iniciativas de blocos como União Europeia, de países como Austrália e Nova Zelândia, e do estado da Califórnia, nos EUA. Trata-se de soluções amplas, que incluem vários setores econômicos, como transportes, indústria e agricultura. Os sistemas de MRV têm características bastante genéricas e acabam se adequando a políticas locais mais específicas, com foco nos setores com maiores potenciais de mitigação de emissões [Observatório ABC 2020].

Embora existam muitas iniciativas, não se encontram em outros países sistemas de MRV amplos e aplicáveis à grande variedade de biomas e de sistemas de produção presentes no Brasil [Perosa et al. 2019]. A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), por meio de uma força tarefa, coordena o desenvolvimento de um sistema MRV no âmbito do Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), sendo essa uma primeira

proposta conceitual baseada em aplicações já existentes na própria EMBRAPA. No entanto, existe o desafio de integrar as aplicações e os dados, de forma a permitir um MRV amplo e economicamente viável para a agricultura brasileira [Observatório ABC 2020].

### 3. Trabalhos Relacionados

Arulnathan et al. (2020) apresentam uma revisão sistemática de ferramentas de apoio a decisão com foco em sustentabilidade de fazendas. O estudo revisou 19 aplicações caracterizando e identificando tendências nas escolhas metodológicas feitas pelos desenvolvedores. Todas elas incluíram estimativas de emissões de GEE. Segundo os autores, essa pode ser considerada a categoria de maior impacto em função da atenção concentrada do setor privado e da política ambiental global.

Dentre as ferramentas avaliadas em [Arulnathan et al. 2020], encontra-se a Ofoot. Em Carlson et al. (2017), a ferramenta Ofoot é apresentada como um sistema para cálculo de estimativas de emissões de gases de efeito estufa em fazendas orgânicas da região conhecida como noroeste do Pacífico, na América do Norte. Consiste em uma aplicação online em que o usuário cadastra a fazenda e relaciona um inventário contendo equipamentos, infraestrutura e materiais de consumo utilizados na propriedade, como tratores, edificações, combustíveis e fertilizantes. Para cada item, o software atribui uma estimativa e no final do processamento é gerado um relatório de totalização das emissões. O uso da ferramenta é limitado à região do noroeste do Pacífico e ao cultivo de alimentos orgânicos, em função da parametrização dos modelos de estimativas.

Em Kim and Baumann (2022) é apresentada uma sugestão de utilização de ontologias na criação de contratos inteligentes em sistemas de MRV utilizando redes *blockchain*. O objetivo da ontologia seria dar suporte aos contratos inteligentes em diferentes plataformas de *blockchain*, proporcionando a padronização e o compartilhamento de conceitos, contribuindo para a interoperabilidade e rastreabilidade de dados entre sistemas MRV. Nesse contexto, a interoperabilidade e a rastreabilidade propiciariam a capacidade de acesso, verificação e referência aos registros de transações que envolvem sistemas heterogêneos [Yaga et al. 2018].

Ju et al. (2022) apresentam uma proposta para otimizar a rastreabilidade de dados de créditos de carbono em redes *blockchain*. O estudo utiliza o conceito de rastreabilidade distribuída, com as etapas de "rastreabilidade *off-chain* e verificação *on-chain*". A técnica é dividida em três estágios: localização, recuperação e verificação. Considerando que o processo de geração dos créditos pode acumular muitos dados, inclusive arquivos, a ideia é que a localização e a recuperação desses dados sejam paralelas e reduzam o custo computacional nas operações de filtragem de documentos. Para isso, utilizam *blockchain* combinado com o sistema de arquivos distribuído IPFS (*InterPlanetary File System*). Os nós da rede *blockchain* armazenam os registros das transações, enquanto os arquivos ficam armazenados no IPFS, sendo a ligação entre eles realizada por ponteiros em formatos de arquivos JSON. A proposta visa diminuir o esforço de busca na rede *blockchain*, delegando a recuperação para o IPFS. Em experimentos realizados, a técnica mostrou-se eficiente, principalmente quando a cadeia de transações é longa, porém, com consumo maior de banda de Internet, em função das constantes interações entre os nós da rede e o sistema IPFS, o que pode ser um fator limitador em alguns casos.

Há uma variedade de estudos destinados ao cálculo de emissões de carbono e sistemas MRV em diversas áreas, incluindo a agropecuária. No entanto, segundo Arulnathan et al. (2020), dificilmente uma solução pode cobrir todas as dimensões de

sustentabilidade, ser usada globalmente e subsidiar de forma satisfatória o apoio à decisão para os agricultores. As aplicações devem priorizar as questões metodológicas para atender seus propósitos específicos. Outros estudos mais recentes [Kim and Baumann 2022] [Ju et al. 2022], sugerem o uso de ontologias e redes *blockchain* no processo de geração de créditos de carbono, ressaltando a importância da rastreabilidade e confiabilidade dos dados.

Nesse sentido, a arquitetura proposta neste estudo incorpora conceitos abordados em outros trabalhos [Carlson et al. 2017][ Kim and Baumann 2022][Ju et al. 2022] diferenciando-se, no entanto, por uma nova metodologia direcionada à realidade brasileira, com foco na geração de conhecimento a partir da integração de diferentes bases de dados, proporcionando suporte à tomada de decisão. A proposta inova ao propor a integração de dados agropecuários com o uso de um modelo ontológico.

#### 4. Proposta de Solução

Este estudo apresenta uma proposta para integração de dados relacionados à cobertura e uso do solo de todo o território brasileiro com foco nas propriedades rurais, considerando suas especificidades, como o bioma, o clima, tipos de cultivo, dentre outras variáveis. Para isso, é apresentada uma arquitetura que integra bases heterogêneas que colaborem com esse objetivo, tais como dados de cultivo do solo, gestão fundiária, estimativas de emissão e estoque de GEE por tipo de cultivo, estimativas de emissão por animais, dentre outras. A arquitetura proposta oferece flexibilidade e extensibilidade necessárias à incorporação de novas bases de interesse, à medida que elas se tornarem disponíveis.

Com os dados integrados, é possível calcular estimativas de “pegada” de carbono nas propriedades rurais e realizar simulações na busca de soluções alternativas de cultivos que possibilitem reduzir as emissões e aumentar o estoque de carbono no solo, assim como identificar padrões de cultivos que produzam bons resultados. Dentro dessa perspectiva, a arquitetura provê suporte à decisão aos usuários, atuando de forma colaborativa, contribuindo para a mitigação das emissões e para a geração de um balanço líquido positivo que poderá ser convertido em créditos de carbono. A arquitetura proposta também oferece suporte à certificação dos créditos de carbono com o uso de ontologia, proveniência e suporte de uma rede *blockchain*. As camadas que compõem a arquitetura são apresentadas na Figura 1 e detalhadas a seguir.

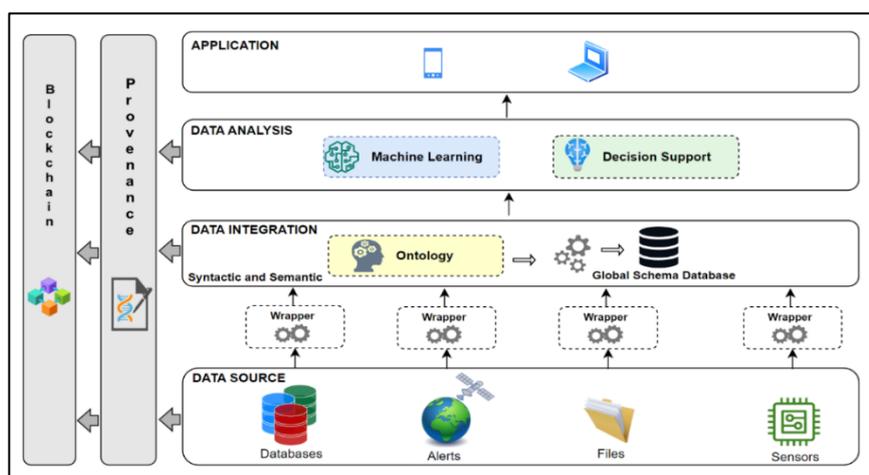


Figura 1: Visão geral da arquitetura proposta para a integração de bases de dados heterogêneas e apoio ao processo de geração de créditos de carbono.

#### 4.1. Integração de Dados

As bases inicialmente integradas à arquitetura são públicas e relacionadas a dados de propriedades rurais, sendo elas: cadastro de propriedades rurais públicas e privadas do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, mapas cartográficos da malha municipal brasileira (IBGE), mapeamento da cobertura vegetal brasileira [Projeto MapBiomas 2021] e a base de cálculo de emissões de CO<sub>2</sub> associadas a 64 tipos de cultivos, pastagens plantadas e silvicultura dos municípios brasileiros [Método BRLUC 2022] [Garofalo et al. 2022]. Para cada base de dados integrada será definido um componente, chamado *wrapper*, responsável por exportar os dados do esquema de origem.

Para que o processo de mensuração seja confiável, é importante que seja embasado em diretrizes e metodologias internacionais, principalmente aquelas propostas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 1996; 2006) [Change IPO 2006]. Desta maneira, a proposta deste estudo é trabalhar com dados fornecidos por órgãos públicos oficiais, organizações não governamentais ou instituições privadas, que utilizem protocolos públicos de coleta, processamento e armazenamento, preferencialmente com publicidade por meio de artigos em periódicos científicos reconhecidos.

A arquitetura prevê a possibilidade da integração de dados de monitoramento enviados por satélites, como alertas de desmatamento, assim como a inclusão de dados de estudos de amostras de solo, dados de gases de efeito estufa capturados por sensores de solo, sensores presentes em animais, dentre outros.

Na integração dos dados é utilizada a estratégia *bottom-up* [Özsu and Valdúriez 2020] que, no contexto de um sistema MRV, refere-se às atividades de coleta de informações sobre emissões de GEE no menor nível organizacional de contabilização e de quantificação [Monzoni 2013]. O menor nível considerado neste estudo é representado pelas áreas de cultivos dentro das propriedades rurais. Uma vez calculadas as estimativas de emissão de GEE em cada área, as mesmas são consolidadas para gerar as estimativas de toda a propriedade.

O processo de integração *bottom-up* ocorre em duas etapas: tradução e geração de esquema. Na primeira etapa, os esquemas de banco de dados são traduzidos para uma representação canônica intermediária comum e na segunda etapa os esquemas intermediários são usados para gerar um esquema global conceitual [Özsu and Valdúriez 2020].

A representação canônica utiliza um modelo ontológico. O uso de ontologia tem o propósito de facilitar a interoperabilidade entre sistemas de MRV, processar novos relacionamentos entre dados e derivar conhecimentos a partir da descoberta desses novos relacionamentos. Kim and Baumann (2022) destacam que os esforços para conceder créditos e incentivos àqueles que reduzem as emissões ou mitigam seus impactos podem ser prejudicados pela incapacidade de contabilizar a quantidade e o impacto das emissões de forma transparente e uniforme, e que o papel das ontologias, neste contexto, seria contribuir para a necessária padronização, compartilhamento e interoperabilidade. A Figura 2 apresenta as principais classes e relacionamentos da versão inicial da ontologia proposta.

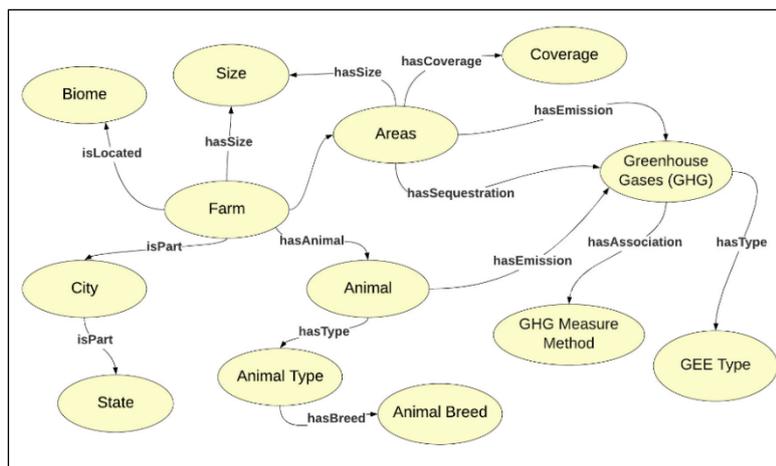


Figura 2: Ontologia inicialmente proposta para a camada de análise sintática e semântica

As principais classes ontológicas são: (i) *Farm*: representa as propriedades rurais. (ii) *Biome*: representa o bioma no qual a área da fazenda está localizada. Os dados do MapBiomas (mapas de uso e cobertura do solo) estão classificados pelos biomas brasileiros (Amazonia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa). É um dado relevante no estudo da cobertura do solo e, por consequência, na emissão e estoque de carbono. (iii) *Size*: tamanho da propriedade rural. (iv) *Areas*: áreas de cultivo (uso do solo) dentro de cada propriedade rural. A soma das áreas resulta no tamanho (*size*) da propriedade. As áreas também podem ser utilizadas para criação de animais, sejam elas com cobertura de pastagens ou de integração entre pecuária, lavoura e floresta. A área foi definida, neste estudo, como o menor nível organizacional de contabilização de emissão e estoque de gases de efeito estufa em uma propriedade. (v) *Coverage*: a cobertura vegetal representa o uso do solo em cada área dentro de uma propriedade (*farm*). Cada tipo de cobertura (floresta, pastagem, cultivos de soja, café, etc) ou até mesmo a inexistência (no caso de solos degradados) poderão ter valores de emissão e de estoque de carbono no solo. (vi) *Animal*: são os animais ruminantes criados nas propriedades rurais (*farm*). Esses animais emitem gases de efeito estufa, como o metano; (vii) *Animal Type*: tipos dos animais criados na propriedade rural (*farm*), como bovinos (boi), caprino (cabras) e ovinos (ovelhas). (viii) *Animal Breed*: raça do animal que pode estar relacionada com a quantidade de emissão de gases de efeito estufa emitida. Os animais não precisam ser computados por área, sendo suficiente contabilizá-los na propriedade (*farm*), considerando que podem ser criados em áreas confinadas ou em grandes áreas integradas com outros cultivos. (ix) *Greenhouse Gases (GHG)*: é a quantidade (em toneladas por ano) de gases de efeito estufa emitido ou sequestrado em cada área ou emitido pelos animais. Os animais emitem, principalmente o metano (CH<sub>4</sub>). As áreas de cultivo emitem, principalmente, CO<sub>2</sub> (gás carbônico) e N<sub>2</sub>O (óxido nitroso, de fertilizantes agrícolas) e sequestram (ou capturam) CO<sub>2</sub>, em função do tipo da cobertura do solo; (x) *GEE Type*: tipo de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>); (xi) *GHG Measure Method*: são os métodos utilizados para contabilizar as emissões. Inicialmente estamos utilizando o BRLUC (*Brazilian Land Use Change*). No entanto, outros métodos poderão ser agregados na arquitetura. (xii) *City e State*: cidade e estado em que está localizada a propriedade rural.

Na continuidade do estudo, outras fontes de dados relacionadas ao uso de fertilizantes agrícolas, rotação de culturas, cálculo de biomassa (volume de vegetação), alimentação e idade dos animais, entre outras, serão incorporadas. Na primeira versão da ontologia foram consideradas apenas aquelas com dados disponíveis. Ontologias propostas

para o mesmo domínio, eventualmente encontradas na literatura, serão analisadas quanto à possibilidade de alinhamento com o nosso modelo.

#### **4.2. Análise e Suporte à Decisão**

O módulo de aprendizado de máquina tem o objetivo de identificar e extrair padrões de uso do solo mais adequados a uma determinada propriedade rural, consideradas as suas características e variáveis envolvidas, como a localização, tamanho, tipo de solo, dentre outros.

O módulo de suporte à decisão visa transformar os processamentos e as análises realizadas nas camadas anteriores em alternativas de soluções para os usuários, ou seja, disponibilizar conhecimento de forma a possibilitar escolhas de melhores condições de aproveitamento do solo e de técnicas de cultivo.

Arulnathan et al. (2020) considera que, embora nem todos os impactos sejam percebidos em escala local, as decisões tomadas localmente influenciam os impactos globais. Os sistemas de suporte à decisão no nível de uma propriedade rural conduzem à tomada de decisões que visam reduzir as emissões atribuíveis a práticas agrícolas específicas do local. Ele considera ainda que a avaliação de fazendas possibilita apoio aos agricultores no gerenciamento dentro da perspectiva da sustentabilidade.

Todas as etapas envolvidas, desde a coleta e integração de dados, bem como o processamento ontológico e uso de técnicas de aprendizado de máquina, devem ser obrigatoriamente registrados, de modo a garantir a veracidade do processo e a imutabilidade das informações utilizadas na tomada de decisão. Estas etapas são registradas nas camadas de proveniência e *blockchain*, a fim de que possam ser relatadas e verificadas em continuidade ao processo de geração de créditos de carbono.

#### **4.3. Proveniência**

A proveniência, às vezes chamada de linhagem dos dados, é a descrição das origens de um dado e o processo pelo qual ele chegou a um banco de dados [Buneman, Khanna and Wang-Chiew 2001], contribuindo para a qualidade, uma vez que pode auxiliar na reputação do agente responsável pela criação, o dispositivo que criou e como os dados foram transformados desde sua criação. Miles et al. (2009) descreve que a proveniência é identificada como um passo essencial para ajudar os usuários a melhor entender, confiar, reproduzir e validar dados.

No contexto desse estudo, a proveniência captura o histórico dos dados desde a sua origem, possibilitando a rastreabilidade. Considerando a necessidade dos requisitos de confiabilidade e conformidade em um processo de geração e certificação de créditos de carbono, torna-se importante conhecer a cadeia de custódia dos dados que geram informações e que subsidiam todo esse processo.

#### **4.4. Blockchain**

O crédito de carbono é um título que pode ser negociável. Um crédito de carbono equivale à redução de uma tonelada de CO<sub>2</sub> (ou gás equivalente) da atmosfera em determinado ano. O certificado significa a verificação por terceiros de que a redução foi efetivamente realizada [Woo et al 2021].

Considerando a possibilidade de os créditos de carbono serem representados para o mercado por meio de contratos inteligentes e os seus respectivos certificados gerados como ativos digitais, todo esse processo pode ser suportado por redes *blockchain*. A

tecnologia *blockchain* é baseada em uma rede distribuída mútua, o que permite um alto nível de confiança entre os usuários e um melhor monitoramento dos dados armazenados. As transações são registradas de forma aberta e permanente, promovendo transparência e rastreabilidade. Chaves públicas e privadas são usadas para proteger os dados criptograficamente, garantindo segurança e autenticidade [UNFCCC 2017].

Com dados confiáveis, as partes podem divulgar todos os registros da cadeia de geração de créditos de carbono, fornecendo provas válidas da autenticidade e disponibilizá-los para o mercado de compensações [Ju et al. 2022]. *Blockchain* aliado aos sistemas de MRV podem atender a essa necessidade [Kim and Baumann 2022].

A utilização de *blockchain* oferece ainda a possibilidade desses ativos serem fracionados para comercialização de forma segura, oferecendo rastreabilidade e democratizando o acesso, permitindo que qualquer pessoa interessada invista em projetos ambientais de sustentabilidade focados na redução de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, em função da sua natureza distribuída, *blockchain* pode melhorar a governança e a sustentabilidade em apoio à ação coletiva destinada a combater as mudanças climáticas [UNFCCC 2017].

A última camada, de aplicação, é a responsável pela interação com os usuários, podendo ser desenvolvida como um aplicativo *mobile* ou *interface web*.

#### 4.5. Colaboração

Apesar do potencial de redução de emissões de carbono, o número de projetos registrados e créditos emitidos pelo setor de agricultura e pecuária é particularmente pouco representativo no mercado de carbono brasileiro [Vargas et al. 2022b][Assad et al. 2021].

Verra (2021) define que o projetos de geração e comercialização de créditos consiste em 4 etapas principais, em que diferentes agentes desempenham papéis de grande importância ao longo de todo o processo. As etapas são: (i) a identificação da metodologia a ser utilizada e a elaboração do projeto; (ii) validação; (iii) monitoramento do projeto e (iv) certificação dos créditos gerados.

Os custos do processo, da concepção até a emissão dos créditos gerados, podem variar em grande extensão a depender de diferentes fatores. Um projeto que, por exemplo, tenha potencial estimado de redução de emissões de 1.000.000 tCO<sub>2</sub> pode custar a partir de USD 170.000 [Vargas et al. 2022b]. Nesse sentido, o conhecimento gerado a partir da integração dos dados na arquitetura proposta poderá contribuir para a redução considerável dos custos, oferecendo uma nova metodologia para estimativas de emissão e estoque de GEE.

Os proprietários rurais, a partir do conhecimento sobre as estimativas de balanço líquido dos gases, poderão interagir com a plataforma, verificando alternativas de uso do solo que possibilitem emitir menos e aumentar o estoque de GEE. A arquitetura também possibilita suporte ao monitoramento dos projetos, seja por meio da integração de dados coletados *in loco* ou de dados do monitoramento remoto, realizado por satélites, como por exemplo, alertas de desmatamento do PRODES-INPE<sup>1</sup> ou do Sistema Planet<sup>2</sup>, que é utilizado por diversos órgãos públicos brasileiros. O registro histórico de todos esses

---

<sup>1</sup> <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>

<sup>2</sup> <https://plataforma-pf.sccon.com.br/#/>

dados, possibilitado pela captura de proveniência e a utilização de redes *blockchain*, auxiliarão no processo de certificação dos créditos gerados.

No entanto, para que o ciclo se complete, faz-se necessário a validação de cada uma das etapas, o que precisará ser feito por meio de entidades públicas, do terceiro setor ou de empresas privadas. Nessas etapas, entendemos ser necessário um ciclo colaborativo, como o proposto pelo Modelo 3C [Fuks et al. 2011], em que seriam fundamentais o suporte à comunicação, à coordenação e à cooperação entre todos os envolvidos. A comunicação fortalece a tomada de decisão e a coordenação permite somar esforços de cooperação em prol da geração e certificação dos créditos de carbono.

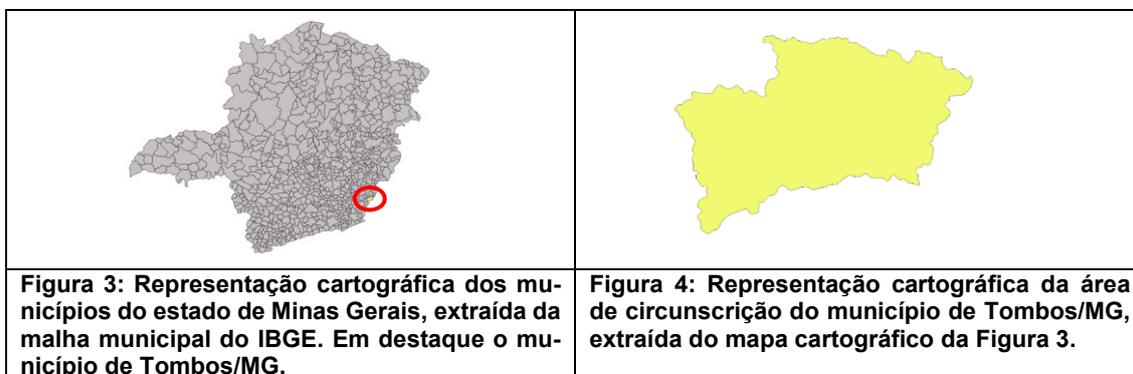
## 5. Resultados Preliminares

Com o intuito de analisar a viabilidade do estudo, foram coletados e integrados dados das seguintes fontes públicas: IBGE, SIGEF, MapBiomias e BRLUC.

No sítio eletrônico do IBGE<sup>3</sup> (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) foram obtidos dados da representação vetorial das linhas definidoras das divisas estaduais e limites municipais. No sítio eletrônico do INCRA<sup>4</sup> (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) foram obtidos os dados do SIGEF, que contém mapas georreferenciados de limites de imóveis rurais públicos e privados.

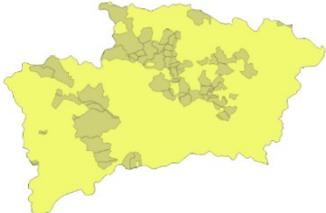
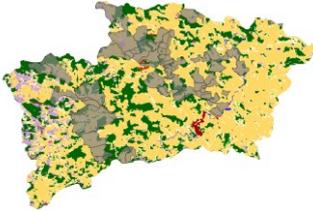
No sítio eletrônico do Projeto MapBiomias foram obtidos dados da cobertura e uso do solo do território brasileiro. O MapBiomias trata-se de uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de uso e cobertura da terra a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite [Projeto MapBiomias 2021]. No sítio eletrônico do BRLUC (*Brazilian Land Use Change*) foram obtidos dados de estimativas de estoque de carbono no solo. O Método BRLUC foi desenvolvido para permitir as estimativas das mudanças diretas de uso da terra e emissões de CO<sub>2</sub> associadas a produtos agropecuários brasileiros [Método BRLUC 2022].

Para realizar a análise de viabilidade do estudo, os dados foram integrados e, em seguida, selecionadas propriedades rurais com coberturas de solo diversificadas, com o intuito de calcular estimativas de estoque de carbono. As imagens, a seguir, demonstram o método de validação definido para extração e integração de dados das fontes supracitadas, sendo um exemplo do cálculo de estoque de carbono para a propriedade rural identificada como “Fazenda União”, localizada no município de Tombos/MG.



<sup>3</sup> <https://bit.ly/402V6oT>

<sup>4</sup> <https://acervofundiario.incra.gov.br/acervo/acv.php>

	
<p><b>Figura 5:</b> Representação cartográfica do município de Tombos/MG integrada com as projeções das propriedades rurais registradas no sistema SIGEF (INCRA).</p>	<p><b>Figura 6:</b> Representação cartográfica do município de Tombos/MG integrada com as projeções das propriedades rurais (SIGEF) e com o mapa de cobertura do solo do ano de 2021 do Projeto MapBiomias.</p>
	
<p><b>Figura 7:</b> Dados integrados na Figura 6 com destaque (em azul, ao centro) para a propriedade rural Fazenda União.</p>	<p><b>Figura 8:</b> Mapa cartográfico da Fazenda União, extraído do mapa cartográfico da Figura 7, com classificações de cobertura do solo do Projeto MapBiomias.</p>

**Tabela 1:** Cálculo de estimativas de estoque de carbono da Fazenda União, pertencente ao município de Tombos/MG.

Códigos de cobertura (MapBiomias)	Classes de cobertura (MapBiomias)	Área (ha)	Estimativas de estoque de carbono por área em tCha-1* (BRLUC)	Cálculo dos totais das estimativas das áreas da Fazenda União (em tCha-1)
3	Formação Florestal	41,29	150,36	6207,61
15	Pastagem	28,42	45,72	1299,56
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	7,95	45,72**	363,28
	<b>Total</b>	<b>77,66</b>		<b>7870,46</b>

\* tCha-1: Tonelada de Carbono por hectare/por ano  
 \*\* A classe "Mosaico de Agricultura e Pastagem" foi subdividida no método BRLUC em três classes: Agricultura Temporária, Agricultura Permanente e Pastagem. Foi utilizado no cálculo o valor da estimativa de Pastagem.

A Tabela 1 mostra o cálculo das estimativas de estoque de carbono no solo da Fazenda União, considerando sua cobertura vegetal, de acordo com o mapa de cobertura e uso do solo [Projeto MapBiomias 2021] e dos valores de estimativas de estoque de carbono para o município de Tombos/MG [Método BRLUC 2022]. O total de carbono estocado calculado é de aproximadamente 7870 tCha-1 (toneladas de carbono por hectare por ano).

O conhecimento gerado com os dados integrados permitiu identificar estimativas dos estoques de carbono da Fazenda União. Neste experimento, apenas os dados de cobertura do solo foram utilizados. Considerando um cenário em que o proprietário da fazenda tem interesse em aumentar o estoque de carbono, poderiam ser avaliadas decisões sobre mudanças no uso da terra, como reduzir áreas de pastagem, aumentar a área de floresta ou substituir áreas de pastagem com outros tipos de culturas que permitem sequestrar mais carbono no solo.

Nas próximas fases desta pesquisa serão consideradas outras fontes de dados, como àquelas relacionadas às emissões de gases de efeito estufa, como por exemplo,

emissões causadas por animais ruminantes, por fontes mecânicas utilizadas nas fazendas, como o uso de eletricidade e motores de combustão, assim como emissões de fontes não mecânicas, como fertilizantes orgânicos e não orgânicos usados nas plantações. Com esses dados, esperamos disponibilizar o balanço líquido de gases de efeito estufa, ou seja, a diferença entre as emissões e o sequestro de carbono em uma fazenda, proporcionando conhecimento que deem suporte às decisões dos proprietários rurais.

## 6. Limitações

O objetivo deste estudo é oferecer uma abordagem para integração de dados relacionados a propriedades rurais, com foco no suporte à decisão que apoie o processo de geração de créditos de carbono no contexto de um sistema de MRV agropecuário. Como um sistema de MRV engloba três etapas (mensuração, relato e verificação), ele tende a ser composto pela integração de sistemas específicos e pela colaboração de diversos atores. Desta maneira, a proposta não aborda todas as necessidades existentes nessas três etapas, mas tão somente colaborar com a proposição de uma arquitetura flexível e extensível destinada ao desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão apto a ser integrado em uma solução de MRV. Além disso, considerando que muitos estudos relacionados ao tema são recentes, a ausência ou incompletude de dados de estimativas de emissão de gases de efeito estufa e estoque de carbono para os tipos de cobertura vegetal do território brasileiro, assim como inconsistências, porventura existentes, nas bases de dados utilizadas, poderão gerar, em alguns casos, análises parciais ou insuficientes, limitando o alcance pretendido.

## 7. Conclusão

Este estudo apresenta uma proposta para integração de dados de bases heterogêneas, com foco na construção de um sistema de suporte à decisão no processo de geração de créditos de carbono em propriedades rurais brasileiras. Nesse sentido, foi especificada uma arquitetura para integrar dados relacionados ao uso do solo e à criação de animais, composta pelas camadas de integração, análise e suporte à decisão e de aplicação. A arquitetura proposta é extensível e flexível à incorporação de outras bases de dados.

Por meio das análises sintática e semântica, é possível gerar informação estratégica e oferecer apoio à decisão aos usuários quanto a alternativas de tipos de cultivos que possibilitem a redução da emissão de gases de efeito estufa e aumente o estoque de carbono no solo nas propriedades rurais. O uso de ontologia contribui para a padronização, compartilhamento e interoperabilidade de informações entre sistemas MRV, além de inferir novos relacionamentos entre os dados integrados. Com o uso da proveniência é possível manter a rastreabilidade dos dados, oferecendo a transparência necessária para apoiar a geração de créditos de carbono e o suporte para a certificação por meio de redes *blockchain*.

Com intuito de realizar uma análise de viabilidade, foram extraídos e integrados dados de fontes heterogêneas a fim de calcular o estoque de carbono de uma propriedade rural, cujos resultados preliminares foram apresentados e considerados satisfatórios. Na continuidade do estudo, outras bases, além das inicialmente propostas, serão integradas e será desenvolvida uma aplicação com implementação das camadas de integração e de análise e suporte à decisão.

## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela UFJF / Brasil, CNPq / Brasil (307194/2022-1) e FAPEMIG / Brasil (APQ-02685-17), (APQ-02194-18). Este estudo também foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Referências

- ABN (2022) “Agropecuária Brasileira em Números”. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-12-2022.pdf/view>, December/2022.
- Arulnathan et al. (2020) “Farm-level decision support tools: A review of methodological choices and their consistency with principles of sustainability assessment”. *Journal of Cleaner Production* 256: Article 120410.
- Assad et al. (2021) “Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização da pecuária até 2030”. Observatório de Bioeconomia. Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas - FGV.
- BICC (2021) “Oportunidades para o Brasil em mercados de carbono”. Brasil International Chamber Of Commerce, [https://www.iccbrasil.org/media/uploads/2021/09/27/opportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono\\_icc-br-e-waycarbon\\_29\\_09\\_2021.pdf](https://www.iccbrasil.org/media/uploads/2021/09/27/opportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono_icc-br-e-waycarbon_29_09_2021.pdf), November/2022.
- Buneman, P., Khanna, S. and Wang-Chiew T. (2001) “Why and where: A characterization of data provenance”. International Conference on Database Theory. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Carlos et al. (2022) “Mercado Voluntário de Carbono: Preservação Ambiental com a Intensificação da Pecuária. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas, [https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/mercado\\_vo.pdf](https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/mercado_vo.pdf), December/2022.
- Carlson, B. R., et al. (2017) “Development of a web application for estimating carbon footprints of organic farms”. *Computers and Electronics in Agriculture* 142: 211-223.
- Change IPO (2006) “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”. *Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan*, [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington\\_Report.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington_Report.pdf), November/2022.
- Fuks, Hugo, et al. (2011) "Teorias e modelos de colaboração." *Sistemas colaborativos*: 16-33.
- Garofalo, Danilo F. Trovo, et al. (2022) “Land-use change CO2 emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil”. *Journal of Cleaner Production* 364: 132549.
- Holloway, V. and Giandomenico, E. (2009) “Carbon Planet White Paper: The History of REDD Policy Friday”, [https://redd.unfccc.int/uploads/2\\_164\\_redd\\_20091216\\_carbon\\_planet\\_the\\_history\\_of\\_redd\\_carbon\\_planet.pdf](https://redd.unfccc.int/uploads/2_164_redd_20091216_carbon_planet_the_history_of_redd_carbon_planet.pdf), November/2022.

- Ju, Chunhua, et al. (2022) "A Novel Credible Carbon Footprint Traceability System for Low Carbon Economy Using Blockchain Technology". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19.16: 10316.
- Kim, H. M. and Baumann, T. (2022) "Towards Ontology and Blockchain Based Measurement, Reporting, and Verification For Climate Action", SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3717389>.
- Letcher, T. M. (2021) "Global warming - a complex situation". *Climate Change*. Elsevier, 3-17.
- Lu, Z. Q. et al. (2022) "Change trend of natural gas hydrates in permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau (1960–2050) under the background of global warming and their impacts on carbon emissions". *China Geology* 5.3: 475-509.
- Método BRLUC: Brazilian Land Use Change (2022) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), <https://brluc.cnpmma.embrapa.br>, December/2022.
- Miles, S., Groth, P., Munroe, S., Moreau, L. (2009) "Prime: A methodology for developing provenance-aware applications". *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* 20(3), 39–46
- Monzoni, M. (2013) "Requerimento para um sistema nacional de monitoramento, relato e verificação de emissões de gases de efeito estufa (volume 1)", <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/15351>, November/2022.
- Mudança do Clima 2021, A Base Científica (2021) "Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima", <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii>, November/2022.
- Observatório ABC (2020) "Proposta de monitoramento, relato e verificação das emissões de gases de efeito estufa da agricultura de baixa emissão de carbono", [https://gvagro.fgv.br/sites/gvagro.fgv.br/files/u115/Relatorio%20MRVAgriculturaABC\\_final\\_200427\\_0.pdf](https://gvagro.fgv.br/sites/gvagro.fgv.br/files/u115/Relatorio%20MRVAgriculturaABC_final_200427_0.pdf), November/2022.
- Observatório do Clima (2021) "Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas de Clima do Brasil 1970-2020". Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), <http://energiaambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020>, November/2022.
- Ozlu, E. et al (2022) "Carbon Footprint Management by Agricultural Practices". *Biology*, 11(10), 1453.
- Özsu, M.T. and Valduriez, P. (2020) "Distributed and Parallel Database Design. In Principles of Distributed Database Systems" (pp. 281–347). Springer, Cham.
- Perosa, B. B. et al. (2019) "Agricultura de baixo carbono no Brasil: potencialidade e desafios para construção de um sistema MRV", Embrapa Meio Ambiente, <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1116505/agricultura-de-baixo-carbono-no-brasil-potencialidade-e-desafios-para-construcao-de-um-sistema-mrv>, November/2022.
- PL 6.539/2019. "Projeto de lei que atualiza a Política Nacional sobre Mudança do Clima", <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2021/11/03/aprovado-projeto-que-atualiza-a-politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>, November/2022.

- Plano ABC (2012) “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura”. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento* (2012), <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>, November/2022.
- Projeto MapBiomas (2021) “Coleção 2021 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil”, <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>, December/2022.
- Shadbolt, N., Berners-Lee, T., & Hall, W. (2006) “The semantic web revisited”, *IEEE intelligent systems*, 21(3), 96-101.
- Singh, N. et al. (2016) “MRV 101: Understanding measurement, reporting, and verification of climate change mitigation”. World Resources Institute, 4-5, <https://ledsgp.org/app/uploads/2016/09/Understanding-measuring-reporting-and-verification-of-climate-change.pdf>, December/2022.
- ThingsBoard: What is ThingsBoard?, <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard>, January/2023.
- UNFCCC (2017) “How Blockchain Technology Could Boost Climate Action”, <https://unfccc.int/news/how-blockchain-technology-could-boost-climate-action>, November/2022.
- Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M. and Ferrera, V. H. P. (2022a) “O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos”. Observatório de Bioeconomia – Escola de Economia de São Paulo – FGV.
- Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M., & Ferreira, V. H. P. (2022b) “Mercado de Carbono Voluntário no Brasil: na realidade e na prática”. Observatório de Bioeconomia. Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas - FGV.
- VERRA: Verified Carbon Standard Projects & Programs (2021), <https://verra.org/project/vcs-program/projects-and-jnr-programs>, Março/2023.
- Wemaere, Matthieu (2009) “Post-2012 Climate Change Agreement. Why MRV is important.” Institut Du Développement Durable Des Relations Internationales, [http://www.iddri.org/Publications/Collections/Ideespour-le-debat/ID\\_0709\\_wemaere\\_mrv.pdf](http://www.iddri.org/Publications/Collections/Ideespour-le-debat/ID_0709_wemaere_mrv.pdf), November/2022.
- Woo, J. et al (2021) “Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature”. *Building and Environment* 205: 108199.
- Yaga, D et al. (2018) “Blockchain Technology Overview”, National Institute of Standards and Technology, NIST Report NIST Internal or Interagency Report (NISTIR) 8202. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202>.