

## Modelo para Determinar a Neutralização dos Gases do Efeito Estufa com Custo Mínimo Usando Árvores Nativas do Cerrado Tocantinense

**Marcelo Lisboa Rocha**

Curso de Ciência da Computação - Universidade Federal do Tocantins  
Av. NS 15, S/N – ALCNO 14 - Bloco 02 – Sala 21, CEP: 77020-210, Palmas - TO  
marcelolisboarochoa@gmail.com

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo planejar a plantação da vegetação nativa do cerrado para captura de carbono com menor custo possível. Para isso, deve-se primeiramente realizar o inventário de emissões de gases do efeito estufa (GEE), através do GHG (Greenhouse Gas) protocol. Com o resultado final de emissões de GEE, realiza-se o cálculo de neutralização de forma otimizada. Para encontrar essa solução otimizada, fez-se uso do algoritmo branch-and-bound.

**PALAVRAS CHAVE.** Otimização, Cálculo de Neutralização, Branch-and-Bound.

**Área Principal:** PO na Agricultura e Meio Ambiente.

### ABSTRACT

This paper aims to plan the planting of native cerrado vegetation for carbon capture with lowest cost possible. For this, must first perform the determination the inventory of emissions of greenhouse gas, using the GHG (Greenhouse Gas) protocol. With the end result of GHG emissions, is performed the calculation of neutralization on an optimized way. To find this optimized solution, was used the branch-and-bound algorithm.

**KEYWORDS.** Optimization, Neutralization Calculation, Branch-and-Bound.

**Main Area:** OR in Agriculture and Enviroment.

### 1. Introdução

As atividades antrópicas em sua maioria provocam a emissão de gases de efeito estufa (GEE), e estão diretamente relacionadas ao processo de urbanização e maior consumo de energia. Para a melhoria da qualidade de vida da população e meio ambiente a metodologia de compensação de carbono é um processo que ajuda a neutralizar o carbono da atmosfera.

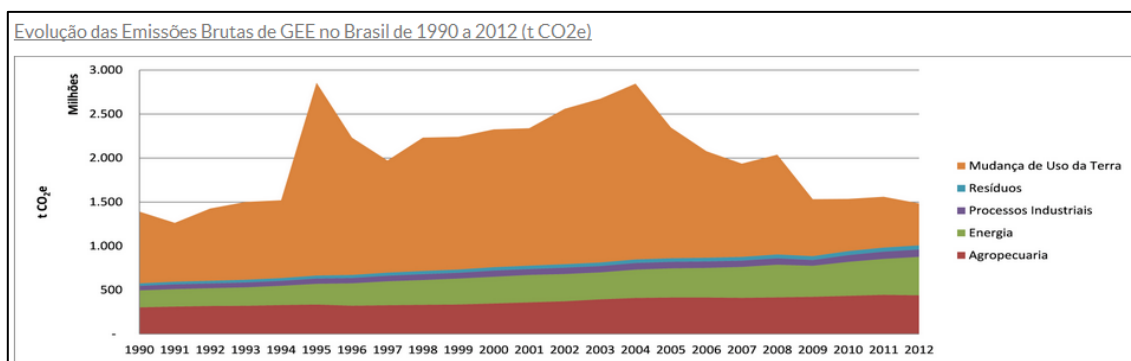


Figura 1- Evolução das Emissões Brutas no Brasil.

(Fonte: <http://seeg.observatoriodoclima.eco.br/index.php/page/17-Emiss%25C3%25B5es-por-setor>).

A evolução das emissões durante os 22 anos, conforme Figura 1, analisados no Sistema de Estimativas de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SEEG) não foi linear. Devido aos altos e baixos verificados no setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas, onde são computadas as emissões relativas ao desmatamento, os totais brasileiros variaram muito, tendo alcançado o seu maior pico em 2004, com 2,9 bilhões de tCO<sub>2</sub>e (toneladas de gás carbônico equivalente). Desde então os totais vêm caindo, acompanhando a expressiva queda do desmatamento da Amazônia.

Diante das consequências causadas pela ação antrópica na atmosfera, torna-se necessário a procura de soluções eficientes como a neutralização de carbono e modelos computacionais que gerenciam essas soluções com mais eficiência e confiabilidade.

Vindo de encontro a esta necessidade, foi desenvolvido um modelo que planeja a neutralização de carbono em que se diferencia dos demais tipos de metodologias, pelo fato de utilizar como referência de pesquisa o Cerrado tocantinense, que tem uma grande quantidade de espécies de árvores para composição do banco de dados de espécies vegetais e que isto seja feito com o menor custo possível.

O IBF (Instituto Brasileiro de Florestas) tem vários empreendimentos sustentáveis, um deles é o projeto Plante Árvores, que foi desenvolvido para empresas e pessoas que queiram neutralizar emissões de CO<sub>2</sub>, através do plantio de árvores nativas. Além desse projeto, existe o site ClickMudas, que é uma alternativa para compra de Mudas e Sementes nativas de todos os biomas brasileiro.

Além de avanços na compensação de CO<sub>2</sub> por meio de projetos socioambientais, muito ainda pode ser feito após o cálculo do inventário de emissões.

A metodologia é uma ferramenta essencial para mostrar a quantidade de GEE emitidos por empresas, permitindo assim que a pesquisa conheça os reais impactos ambientais e desta forma promova ações ambientais para compensação.

Atualmente, o procedimento mais utilizado para calcular emissões de GEE é a ferramenta GHG (Greenhouse Gas) Protocol, que traz toda a metodologia internacionalmente aceita e desenvolvida com a parceria entre a World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), entidades que há uma década trabalham com empresas, governos e grupos ambientais quanto ao desenvolvimento do trabalho será centrada em torno da técnica chamada Branch-and-Bound (B&B) que tem como idéia geral dividir o conjunto de soluções viáveis em subconjuntos de interseções entre si, calculando os limites superiores e inferiores para cada subconjunto de acordo com as regras preestabelecidas, ou seja, o método B&B baseia-se na idéia de desenvolver uma enumeração inteligente dos pontos candidatos à solução ótima inteira do problema (LONGO, 2004).

Este trabalho, além de apresentar um modelo para neutralização de carbono com custo mínimo, também apresenta resultados computacionais para o problema.

Este artigo está organizado como segue. A próxima seção introduz conceitos gerais a respeito do processo de compensação de carbono adotado neste trabalho, tais como: bioma cerrado, GHG Protocol, o que é o inventário de emissões e como é feito o cálculo de neutralização atualmente. A seção 3 apresenta a proposta de aplicação da técnica de B&B para minimização do custo de planejamento do processo de captura de carbono. Já a seção 4 apresenta os resultados computacionais obtidos pela aplicação da técnica B&B com dados realísticos. Finalmente, na seção 5 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Considerações Gerais

As mudanças climáticas e o aquecimento global são atualmente grandes preocupações mundiais. As maiores fontes de emissão de GEE incluem a queima de combustíveis fósseis, os desmatamentos e as queimadas, todas liberando  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. O efeito estufa é um fenômeno físico, que acontece naturalmente, ocasionado pela presença de gases na atmosfera, a qual é composta principalmente de oxigênio (21%) e nitrogênio (78%). Os principais GEE são o vapor d'água, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (CHANG, 2004).

O aquecimento global, por sua vez, vem aumentando nas últimas décadas em função do aumento das emissões dos GEE pela civilização. O crescente aquecimento global gerado, representa um risco à vida na Terra.

O conceito de sequestro de carbono foi consagrado na Conferência de Kyoto (SISTER, 2008), em 1997, que tinha como objetivo conter e reverter o acúmulo de GEE na atmosfera resultante da atuação humana (CHANG, 2004). Uma maneira de reverter essa situação é a fixação de carbono em florestas. Em princípio, sequestro (fixação) de carbono, aplica-se à preservação de áreas florestais com riscos de serem destruídas, à recuperação de florestas degradadas e ao estabelecimento de novas plantações florestais, assim como à implantação de sistemas agroflorestais com espécies nativas ou exóticas (CHANG, 2004). Isto, dado que os ecossistemas acumulam na sua biomassa o carbono retirado da atmosfera durante o processo de fotossíntese. As plantas absorvem gás carbônico e, usando água e energia da luz solar, convertem o gás carbônico em glicose. O oxigênio ( $\text{O}_2$ ) é liberado durante a produção de biomassa (RENNER, 2004).

O Protocolo de Kyoto busca reverter os danos provocados pelo aquecimento global, contendo orientações para que, principalmente os governos dos países industrializados, venham a diminuir suas emissões de GEE, colaborando assim, com a normalização do efeito estufa. Desta forma, as medidas de compensação ambiental têm mobilizado pessoas e instituições nesta causa. Tais medidas, consistem na tomada de atitudes que venham a diminuir a emissão dos gases, ou ainda, retirar parte desses gases da atmosfera, aliviando o efeito estufa no planeta.

Uma das formas mais utilizadas de compensação ambiental é a através da neutralização de emissões de carbono por pessoas, empresas, indústrias, órgãos públicos e/ou eventos com o plantio de mudas nativas, que por sua vez, incorporam o  $\text{CO}_2$ , retirando-o da atmosfera.

O processo de compensação ambiental através da neutralização de emissões de carbono pelo plantio de mudas nativas é composto basicamente de três etapas (QUINTINO e AZEVEDO, 2012):

- Inventário de emissões de  $\text{CO}_2$
- Cálculo de neutralização
- Plantio e manutenção de mudas nativas

A seguir, serão colocados os principais conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

### 2.1. Cerrado

Segundo o Ministério do meio Ambiente (2013), o Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando uma área de 2.036.448  $\text{km}^2$ , cerca de 22% do território nacional. A sua área contínua incide sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, além dos enclaves no Amapá, Roraima e Amazonas. Neste espaço territorial encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata), o que resulta

em um elevado potencial aquífero e favorece a sua biodiversidade.

Nessa região, as emissões mais importantes de GEE são de CO<sub>2</sub>, resultantes da transformação de florestas em áreas agrícolas ou pastagens.

## 2.2. Compensação de Carbono

A compensação ambiental pode ser entendida como um mecanismo de responsabilização dos empreendedores causadores de significativo impacto ambiental pelo prejuízo que causam ao meio ambiente. Uma forma de amenizar as causas geradas pelas empresas é promovendo o reflorestamento de áreas degradadas.

Diversas atividades desenvolvidas pelos empreendedores repercutem negativamente sobre o meio ambiente. Em contrapartida, os empreendedores devem compensar este impacto negativo sobre o meio ambiente. Uma forma de realizar esta compensação é através do florestamento ou reflorestamento, que nos últimos tempos, tem sido essencial na preservação dos diferentes biomas e fundamental para a manutenção do equilíbrio biológico.

## 2.3. GHG Protocol

O GHG (*Greenhouse Gas*) Protocol, lançado em 1998 e revisado em 2004, é hoje a ferramenta mais utilizada mundialmente pelas empresas e governos para entender, quantificar e gerenciar suas emissões. De acordo com as Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol a metodologia é compatível com as normas da International Organization for Standardization (ISO) e com as metodologias de quantificação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC), e sua aplicação no Brasil, a partir do início do Programa Brasileiro GHG Protocol, em 2008, acontece de modo adaptado ao contexto nacional. Além disso, as informações geradas podem ser aplicadas aos relatórios e questionários de iniciativas como Carbon Disclosure Project, Índice Bovespa de Sustentabilidade Empresarial (ISE) e Global Reporting Initiative (GRI).

Existem vários benefícios para as organizações participantes do programa, que são:

- **Vantagem competitiva** - Calcular, participar de benchmarkings e gerenciar as emissões de GEE pode garantir a sustentabilidade dos negócios e a melhoria de eficiências;
- **Melhoria nas relações com públicos de interesse (stakeholders)** - O desenvolvimento de um inventário corporativo/institucional de GEE, baseado em critérios e padrões internacionais, permite à empresa publicar informações fidedignas segundo os critérios do Carbon Disclosure Project, do Índice Bovespa de Sustentabilidade Empresarial (ISE), da Global Reporting Initiative (GRI), entre outros de interesse para financiadores, consumidores e outros públicos;
- **Registro histórico de dados** - O estabelecimento de um registro histórico de emissões de GEE permite às organizações adotarem medidas voluntárias de melhoria em seus processos, que poderão ser consideradas sob legislação ou regulamentos programáticos eventualmente adotados no futuro;
- **Condições para participar nos mercados de carbono** - As empresas que publicam seus inventários de emissões de GEE podem, com essa atividade, identificar oportunidades para redução de emissões e, dessa forma, realizar projetos passíveis de obtenção de créditos comercializáveis no mercado de carbono.

O objetivo maior do Programa é promover, por meio de engajamento e capacitação técnica e institucional, uma cultura corporativa de caráter voluntário para a identificação, o cálculo e a elaboração de inventários de emissões de GEE.

## 2.4. Inventário de Emissões

O inventário de emissões de GEE deve ser feito fazendo uso do GHG Protocol. O GHG Protocol traz toda a metodologia internacionalmente aceita, a formulação do inventário de emissões de GEE, desenvolvido com a parceria entre a *World Resources Institute* (WRI) e *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD). O programa brasileiro - GHG Protocol, foi realizado pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (GVces), que contou com a parceria do Ministério do Meio Ambiente, WRI e WBCSD na organização.

Amplamente utilizado por governos e empresas em todo o mundo, o GHG Protocol é uma metodologia que orienta o controle e registro de emissões, permitindo compreender e quantificar geradores dos GEE, garantindo informações confiáveis. Na prática, o GHG Protocol, fornece um quadro contábil para a medição de todos os GEE existentes e a conversão desses poluentes em CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e), a equivalência convencionalmente utilizada como parâmetro para inventários de emissões de GEE. Ao final, tem-se o total em CO<sub>2</sub>e das emissões de GEE da organização.

## 2.5. Cálculo de Neutralização

A neutralização do CO<sub>2</sub>e emitido, nada mais é do que a retirada desse CO<sub>2</sub> da atmosfera e sua conversão em biomassa pela reação da fotossíntese. A reação permite o crescimento das árvores e o acúmulo de biomassa através da absorção do CO<sub>2</sub> e a liberação de oxigênio (O<sub>2</sub>) na atmosfera, fixando o carbono (C) nos troncos, galhos, folhas e raízes. A Figura 2 representa bem esse processo.

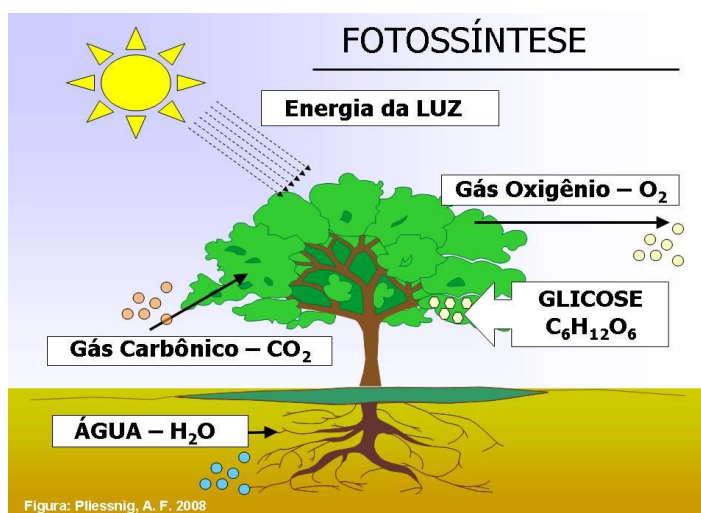


Figura 2: Esquema da Fotossíntese

(Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=1668>)

O sequestro de carbono através de atividades florestais se baseia em dois aspectos. Primeiro, o gás carbônico é um gás atmosférico que circula no mundo todo. Então, os esforços para a remoção dos GEE terão efeito igual, sejam eles aplicados ao lado de potenciais poluidores ou do outro lado do mundo. Segundo, as florestas retiram o gás carbônico da atmosfera através da fotossíntese, convertendo em compostos orgânicos utilizados no seu crescimento e no metabolismo vegetal (Fernandes, 2007).

Para realizar o cálculo, é preciso a partir do resultado final de emissão de GEE em tCO<sub>2</sub>e (determinado após o inventário de emissões) e de dados de fixação de carbono pelas árvores, estipular o número de espécies arbóreas nativas a serem plantadas para neutralizar o CO<sub>2</sub> emitido pelo período de um ano. Atualmente, a determinação do número de espécies arbóreas nativas a serem plantadas

para neutralizar a emissão de CO<sub>2</sub> é feita de uma maneira muito simples, como segue:  $N = [(Q \times 43)]$ , onde N é o número de árvores a serem plantadas em função do teto de Q (quantidade de carbono em tCO<sub>2</sub>e estimado no inventário) vezes 43 que é a quantidade de árvores nativas necessárias para neutralizar 1 tCO<sub>2</sub> em um período de 10 anos de acordo com (EMBRAPA, 2004) e (Lima, Reginato e Bartholomeu, 2007).

### **3. Aplicação do Branch-and-Bound para Minimização do Custo no Planejamento do Processo de Captura de Carbono**

A modelagem matemática utilizada no problema proposto e sua posterior solução foi via o método Branch-and-Bound (B&B). A modelagem matemática do problema proposto foi realizada com o intuito de relacionar: as variáveis envolvidas, as restrições (limitações) impostas e a função objetivo (o que será desejado otimizar - para este problema é a minimização do custo total de plantio) (LACHTERMACHER, 2002). Neste caso específico, o problema foi modelado como um problema de programação linear inteira. Já quanto ao método B&B, que é um método clássico para obtenção de soluções para problemas de programação linear inteiro (GOLDBARG e LUNA, 2000), que foi utilizado para resolver (dar uma solução) para o problema. Uma das questões a serem analisadas neste trabalho é se para a dimensionalidade dos modelos gerados será possível executar o método B&B até o final (garantindo a obtenção da solução ótima para o problema) ou com limite de tempo (obtendo uma solução aproximada com garantia de distância máxima para o ótimo).

Trata-se de uma estrutura em árvore, caracterizadas pelo particionamento do conjunto de soluções por um critério dado (*branching*). Dessa forma se deixa de examinar grande parte das soluções, o que contribui para acelerar a obtenção de resultados ótimos.

Para a criação do modelo matemático a ser solucionado, foi necessário seguir a regulamentação para reflorestamento. Segundo a Resolução SMA 58, de 30-12-2006, onde fixa a orientação para o reflorestamento heterogêneo de áreas degradadas e dá providências correlatas. Nela cita outras especificações utilizadas pelo IBF, para identificar as mudas de forma a compensar a quantidade média acima citada:

- 1º - Em relação ao número de espécies a ser utilizado nas situações de plantio:
  - a. devem ser utilizadas, no mínimo, 20% de espécies zoocóricas nativas da vegetação regional;
  - b. devem ser utilizadas, no mínimo, 5% de espécies nativas da vegetação regional, enquadradas em alguma das categorias de ameaça (vulnerável em perigo, criticamente em perigo ou presumivelmente extinta);
  - c. nos plantios em área total, as espécies escolhidas deverão contemplar os dois grupos ecológicos: pioneiras (pioneiras e secundárias iniciais) e não pioneiras (secundárias tardias e climácicas), considerando o limite mínimo de 40% para qualquer dos grupos, exceto para a savana florestada (cerradão).
- 2º - Em relação ao número de indivíduos a ser utilizado nas situações de plantio:
  - a. O total dos indivíduos pertencentes a um mesmo grupo ecológico (pioneiro e não pioneiro) não pode exceder 60% do total dos indivíduos do plantio;
  - b. Nenhuma espécie pioneira pode ultrapassar o limite máximo de 20% de indivíduos do total do plantio;
  - c. Nenhuma espécie não pioneira pode ultrapassar o limite máximo de 10% de indivíduos do total do plantio;
  - d. Dez por cento (10%) das espécies implantadas, no máximo, podem ter menos de doze (12) indivíduos por projeto.

Todas essas especificações foram utilizadas no software como parâmetros do sistema, para que seja escolhida a melhor muda para cada tipo de solo e com o menor custo.

A seguir, a formulação do método para resolução do problema de acordo com os critérios especificados.

$X_{ijzk}$  - Variável de decisão - Quantidade de árvore/muda a ser utilizada;

$i = \{\text{Chimbuva, Gabiroba, ...}\} \rightarrow$  Nome Popular  $i = 1 \dots n$  é a quant. de espécies.

$j = \{\text{zoocórica, anemocórica}\} \rightarrow$  Dispersão.  $j = 1 \dots m$  é a quant. de dispersões

$z = \{\text{pioneira, não pioneira}\} \rightarrow$  Grupo Ecológico.  $z = 1 \dots p$  é a quant. de grupos ecológicos

$k = \{\text{em perigo, não ameaçada}\} \rightarrow$  Categoria de ameaça  $k = 1 \dots q$  é a quant. de categorias de ameaça

$C_i$  = é o custo da muda  $i$

$X_{ijzk}$  = quantidade da muda/arvore  $i$ , utilizada da dispersão  $j$ , do grupo ecológico  $z$  e da categoria de ameaça  $k$ .

$N$  = é o número mínimo de árvores a serem plantadas de acordo com o especificado na seção 2.5.

Minimizar  $\sum_{i=1}^n C_i X_{ijzk}$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^n X_{i1zk} \geq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.2 \quad (1) \text{ Mínimo de 20\% de espécies zoocóricas.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijz1} \geq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.05 \quad (2) \text{ Mínimo de 5\% de espécies da categoria de ameaçada.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijzk} \geq N \quad (3) \text{ O número de árvores a serem utilizadas é no mínimo N.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i11k} \geq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.4 \quad (4) \text{ Número de árvores pioneiras de no mínimo de 40\% do total.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i21k} \geq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.4 \quad (5) \text{ Número de árvores não pioneiras de no mínimo de 40\% do total.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i11k} \leq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.6 \quad (6) \text{ Número de árvores pioneiras não maior que 60\% do total.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i21k} \leq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.6 \quad (7) \text{ Número de árvores não pioneiras não maior que 60\% do total.}$$

$$X_{i11k} \leq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.2 \quad (8) \text{ Quantidade de cada árvore pioneira não ultrapasse 20\% do total.}$$

$$X_{i21k} \leq \sum_{i=1}^n X_{ijzk} * 0.1 \quad (9) \text{ Quantidade de cada árvore não pioneira não ultrapasse 10\% do total.}$$

$$X_{ijzk} \in Z^+ \quad (10) \text{ Todas as variáveis são inteiras positivas.}$$

#### 4. Resultados Computacionais

O ponto de partida do processo é a determinação do inventário de emissões do GEE emitidos, calculando a quantidade de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (tCO<sub>2</sub>e) que foram produzidos.

Com a especificação do cálculo da quantidade gerada de tCO<sub>2</sub>e feita pelo protocolo GHG foge do escopo deste trabalho por ser complexo e necessita do desenvolvimento de um outro sistema para ser realizado. Assim sendo, o mesmo não será apresentado neste trabalho. Contudo, esta informação é fundamental para a determinação do número de cada espécie vegetal nativa do Tocantins a ser utilizada no reflorestamento de modo a neutralizar a quantidade de carbono (tCO<sub>2</sub>e) especificado.

Após vários questionamentos realizados ao IBF (Instituto Brasileiro de Florestas) para saber como é realizado o reflorestamento, foi iniciado um dos componentes mais importantes deste trabalho que foi o levantamento das principais espécies vegetais nativas do Tocantins, o meio utilizado para obter essas informações importantíssimas foi através do site <http://www.clickmudas.com.br/>, criado pela IBF como uma alternativa para compra de mudas e sementes nativas de todos os biomas brasileiros.

Foi feita a análise dos dados obtidos nas descrições das mudas que contém no site, e a partir daí foi montado uma tabela para organizar os dados existentes.

Tabela 1. Exemplo com 6 tipos de mudas consideradas.

| ESPECIE                  | NOME POPULAR  | DISPERSÃO   | GRUPO ECOLOGICO   | categoria de ameaça | custo unitario |
|--------------------------|---------------|-------------|-------------------|---------------------|----------------|
| Enterolobium timbouva    | Chimbuva      | zoocorica   | Pioneira          | Não Ameaçada        | R\$ 1,20       |
| Calophyllum brasiliensis | Guanandi      | zoocorica   | não pioneira      | Em perigo           | R\$ 2,50       |
| Cedrela fissilis         | Cedro Rosa    | anemocorica | não pioneira      | Em perigo           | R\$ 5,00       |
| Cordia ecalyculata       | Café de Bugre | zoocorica   | não pioneira      | em perigo           | R\$ 5,00       |
| Peltophorum dubium       | Canafistula   | zoocorica   | pioneira          | em perigo           | R\$ 12,50      |
| Anadenanthera colubrina  | Angico Branco | anemocorica | Secundária tardia | Não Ameaçada        | R\$ 5,00       |

A seguir, é apresentada a resolução do modelo computacional proposto na seção 3, levando em consideração os 6 tipos de mudas da Tabela1. Caso se deseje neutralizar 200 tCO<sub>2</sub>e em 10 anos deve-se utilizar no mínimo N = 8600 mudas/árvore, tem-se:

$$N = [(Q \times 43)]$$

$$N = [(200 \times 43)] = 8600 \text{ mudas}$$

Segue abaixo a formulação do método com os dados propostos.

MINIMIZAR  $1.2X_{1112} + 2.5X_{2121} + 5X_{3221} + 5X_{4121} + 12.5X_{5111} + 5X_{6222}$

Sujeito a

$$\begin{aligned} X_{1112} + X_{2121} + X_{4121} + X_{5111} - 0.2X_{1112} - 0.2X_{2121} - 0.2X_{3221} - 0.2X_{4121} - 0.2X_{5111} - 0.2X_{6222} &\geq 0 \\ X_{2121} + X_{3221} + X_{4121} + X_{5111} - 0.05X_{1112} - 0.05X_{2121} - 0.05X_{3221} - 0.05X_{4121} - 0.05X_{5111} - 0.05X_{6222} &\geq 0 \\ X_{1112} + X_{2121} + X_{3221} + X_{4121} + X_{5111} + X_{6222} - 8600 &\geq 0 \\ X_{1112} + X_{5111} - 0.4X_{1112} - 0.4X_{2121} - 0.4X_{3221} - 0.4X_{4121} - 0.4X_{5111} - 0.4X_{6222} &\geq 0 \\ X_{2121} + X_{3221} + X_{4121} + X_{6222} - 0.4X_{1112} - 0.4X_{2121} - 0.4X_{3221} - 0.4X_{4121} - 0.4X_{5111} - 0.4X_{6222} &\geq 0 \\ X_{1112} + X_{5111} - 0.6X_{1112} - 0.6X_{2121} - 0.6X_{3221} - 0.6X_{4121} - 0.6X_{5111} - 0.6X_{6222} &\leq 0 \\ X_{2121} + X_{3221} + X_{4121} + X_{6222} - 0.6X_{1112} - 0.6X_{2121} - 0.6X_{3221} - 0.6X_{4121} - 0.6X_{5111} - 0.6X_{6222} &\leq 0 \\ X_{1112} - 0.2X_{1112} - 0.2X_{2121} - 0.2X_{3221} - 0.2X_{4121} - 0.2X_{5111} - 0.2X_{6222} &\leq 0 \\ X_{5111} - 0.2X_{1112} - 0.2X_{2121} - 0.2X_{3221} - 0.2X_{4121} - 0.2X_{5111} - 0.2X_{6222} &\leq 0 \\ X_{2121} - 0.1X_{1112} - 0.1X_{2121} - 0.1X_{3221} - 0.1X_{4121} - 0.1X_{5111} - 0.1X_{6222} &\leq 0 \\ X_{3221} - 0.1X_{1112} - 0.1X_{2121} - 0.1X_{3221} - 0.1X_{4121} - 0.1X_{5111} - 0.1X_{6222} &\leq 0 \\ X_{4121} - 0.1X_{1112} - 0.1X_{2121} - 0.1X_{3221} - 0.1X_{4121} - 0.1X_{5111} - 0.1X_{6222} &\leq 0 \\ X_{6222} - 0.1X_{1112} - 0.1X_{2121} - 0.1X_{3221} - 0.1X_{4121} - 0.1X_{5111} - 0.1X_{6222} &\leq 0 \end{aligned}$$

Integer  $X_{1112} X_{2121} X_{3221} X_{4121} X_{5111} X_{6222}$

## SOLUÇÃO DO PROBLEMA

**Custo Total = R\$48267,50**

|              |   |             |                                      |
|--------------|---|-------------|--------------------------------------|
| 1 X1112      | = | 2150        | <==Número de árvores do tipo 1       |
| 2 X2121      | = | 1075        | <==Número de árvores do tipo 2       |
| 3 X3221      | = | 1075        | <==Número de árvores do tipo 3       |
| 4 X4121      | = | 1075        | <==Número de árvores do tipo 4       |
| 5 X5111      | = | 2150        | <==Número de árvores do tipo 5       |
| 6 X6222      | = | 1075        | <==Número de árvores do tipo 6       |
| <b>Total</b> | = | <b>8600</b> | <b>&lt;==Número total de árvores</b> |

A solução do modelo foi obtida através de um programa codificado na linguagem C e fazendo-se uso da API do GLPK (GLPK, 2014) que disponibiliza o método B&B em uma máquina com processador Intel Core I5 M450 de 2.4Ghz e 4 Gb de RAM DDR3.

Dada a solução do modelo proposto pelo método B&B com os dados apresentados (que levou 0.1 ms de tempo de execução na máquina especificada), tem-se que deve-se utilizar 2150 árvores do tipo 1, 1075 árvores do tipo 2, 1075 árvores do tipo 3, 1074 árvores do tipo 4, 2150 árvores do tipo 5 e 1075 árvores do tipo 6, totalizando 8600 árvores a serem plantadas a um custo mínimo de R\$48267,50. O número de árvores a serem plantadas, proposto pelo modelo resolvido foi o mesmo que o calculado pelo método simplório descrito na seção 2.5, contudo, obedecendo a Resolução SMA 58 de 30-12-2006, quanto a questões e limitações de utilização de cada espécie e tipo de árvore, o que é totalmente ignorado pelo método simplório. Assim sendo, o método aqui proposto, apresenta uma solução mais realística, obedecendo a legislação pertinente e dando o custo final (mínimo) do reflorestamento para captura de carbono levando em consideração o valor dos diferentes tipos de árvores/mudas.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta desktop, que gerencie a plantação de mudas nativas do cerrado com o custo mínimo, com intuito de intensificar o desenvolvimento e utilização de sistemas inteligentes para solucionar problemas do cotidiano, onde a adaptação com o meio não é levada em consideração, causando retrabalho no desenvolvimento para se adequar a realidade que está em constante mudança.

Foi desenvolvida uma ferramenta voltada para determinar o numero de cada espécie nativa a ser utilizada no reflorestamento, com os respectivos valores de modo a neutralizar a quantidade de carbono ( $tCO_2e$ ) especificado.

Com o intuito de facilitar as atividades na área florestal, principalmente as empresas que tanto liberam  $CO_2$  na atmosfera com suas atividades de produção. O presente trabalho mostrou espécies do Bioma do Cerrado que conseguem estocar grandes quantidades de carbono sendo então indicados para a recuperação de áreas degradadas.

Utilizando essa ferramenta o usuário consegue planejar e gerenciar o seu reflorestamento através do cálculo de neutralização, determinando os resultados para realizar a sua compensação com transparência e agilidade.

### 5.1. Trabalhos Futuros

É certa, então, a importância da quantificação de carbono estocada nas florestas. E como o Bioma do cerrado consegue estocar grandes quantidades de carbono mesmo sendo um dos biomas mais explorados para criação de gado e uso da terra é mais importante ainda para os estados que tem

esse tipo de Bioma. Assim sendo, um possível trabalho futuro é a inserção no modelo da quantidade de carbono que cada tipo de árvore/muda captura, tornando o modelo ainda mais preciso.

Outra proposta de trabalho futuro, é fazer testes com uma maior quantidade de árvores/mudas e fazer comparações com situações reais de reflorestamento com intuito de captura de carbono e comparar o custo de ambas as soluções. Finalmente, seria também interessante, verificar o ganho financeiro com a venda de créditos de carbono como também com a venda da madeira ao final do projeto.

## Referências

- BRASIL.**, Ministério do Meio Ambiente. Biomas do cerrado, disponível em :<<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado> ,acessado em 10 Nov. 2013.
- BRASIL.**, Ministério da Ciência e Tecnologia. O Protocolo de Quioto. Disponível em:<<http://www.mct.gov.br/clima/quioto/protocol.htm>>, Acesso em 05 de Out de 2013
- Chang, M. Y.**, Sequestro florestal do carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas. Curitiba, 2004. 276 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- Embrapa** (2004), Cultivo de Espécies Nativas do Bioma Cerrado. Disponível em <http://www.cpac.embrapa.br/download/234/t>
- GLPK** (2014). GNU Linear Programming Kit. Disponível em <http://www.gnu.org/software/glpk/>
- Goldberg, M. C.; Luna, H. P. C.**, Otimização Combinatória e Programação Linear. Editora CAMPUS, Rio de Janeiro, 2000.
- Lachtermacher, G.**, Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões. Editora CAMPUS, Rio de Janeiro, 2002.
- Lima, L. M. T, Reginato, G. A. e Bartholomeu, D. B.** (2007), Levantamento de estimativas de absorção de carbono por florestas nativas e comerciais no Brasil. Publicado em 15o. SIICUSP. Disponível em <https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoObter?numeroInscricaoTrabalho=820&numeroEdicao=15&print=S>
- Longo, H. J.**, Técnica para Programação Inteira e aplicações em Problemas de Roteamento de Veículos. Tese Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- Quintino, I. E. e Azevedo, M. F. de C.**, Um programa de compensação ambiental que neutraliza emissões de carbono através de projetos socioambientais de plantio de mudas nativas. Manual Técnico. Macaé-RJ, 2010. Disponível em <<http://www.ambientalcompany.com.br/Arquivos/Manual%20T%C3%A9cnico%20-%20Pegada%20Verde.pdf>>. Acesso em: 05 de Set. 2012.
- Renner, R. M.**, Sequestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- Sister, G.**, Mercado de Carbono e Protocolo de Quioto. Ed. Campus, 2008.