

Artigo

Ciclagem de Nitrogênio em Florestas Tropicais e Plantações de Eucalipto no Brasil no Antropoceno

Silva, J. J. N.; de Mello, W. Z.; Rodrigues, R. A. R.;* Alves, B. J. R.; de Souza, P. A.; da Conceição, M. C. G.

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (6), 1792-1808. Data de publicação na Web: 12 de dezembro de 2018

<http://rvq.sbq.org.br>

Nitrogen Cycling in Tropical Forests and Eucalyptus Plantations in Brazil in the Anthropocene

Abstract: The nitrogen is a macronutrient essential for the functioning of the metabolism of living beings. However, due to the changes that the planet has been passing in the Anthropocene, the nitrogen cycling has been altered. Deforestation combined with changes in land use are primarily responsible for the change in their cycling. Emissions of greenhouse gases such as N_2O were increased due to this deforestation and inadequate soil management practices, and this contributed to the fact that these changes in nitrogen cycling occurred. Considering the importance of nitrogen and the changes that it has undergone in the last decades, this work of revision aims to describe the role of nitrogen and the changes in its cycling due to the processes of land use change that occurred in the Anthropocene in forest areas tropical and eucalyptus plantations in Brazil.

Keywords: Anthropocene; nitrogen cycle; planted forest; nitrogen oxides.

Resumo

O nitrogênio é um macronutriente essencial para o funcionamento do metabolismo dos seres vivos. Porém, devido às mudanças que o planeta vem passando no Antropoceno a ciclagem do nitrogênio vem sendo alterada. O desmatamento aliado às mudanças do uso do solo são os principais responsáveis pela alteração da sua ciclagem. As emissões de gases de efeito estufa como do N_2O foram aumentadas em virtude desse desmatamento e das inadequadas práticas de manejo do solo, e isso acabou contribuindo para que essas mudanças na ciclagem do nitrogênio ocorressem. Visto a importância do nitrogênio e das alterações que ele vem passando nas últimas décadas, este trabalho de revisão tem como objetivo descrever o papel do nitrogênio e as alterações na sua ciclagem devido aos processos de mudança do uso da terra ocorridos no Antropoceno em áreas de florestas tropicais nativas e plantações de eucalipto no Brasil.

Palavras-chave: Antropoceno; ciclo do nitrogênio; floresta plantada; óxidos de nitrogênio.

* Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, CEP 22460-000, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ renato.rodrigues@embrapa.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20180118](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180118)

Ciclagem de Nitrogênio em Florestas Tropicais e Plantações de Eucalipto no Brasil no Antropoceno

Jacqueline J. N. da Silva,^a William Z. de Mello,^a Renato A. R. Rodrigues,^{b,*}
Bruno J. R. Alves,^c Patrícia A. de Souza,^d Marcela C. G. da Conceição^a

^a Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Geoquímica, CEP 24020-141, Niterói-RJ, Brasil.

^b Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, CEP 22460-000, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

^c Embrapa Agrobiologia, Rodovia BR-465, Km 7, CEP 23890-000, Seropédica-RJ, Brasil.

^d Universidade Federal de Tocantins, campus Gurupi. Rua Badejós, Lote 7, Chácaras 69/72, Zona Rural, CEP 77402-970, Gurupi-TO, Brasil.

* renato.rodrigues@embrapa.br

Recebido em 30 de outubro de 2018. Aceito para publicação em 30 de outubro de 2018

1. **Introdução**
2. **Antropoceno: Reflexos sob Sistemas Florestais Naturais e Antrópicos**
 - 2.1. Florestas tropicais naturais
 - 2.2. Plantações de eucalipto
3. **Nitrogênio: Funções e Importância**
4. **Mudanças do uso da Terra no Antropoceno: Influências Sob a Ciclagem do Nitrogênio**
 - 4.1. Entradas de nitrogênio
 - 4.2. Acúmulo de serrapilheira e estoques de nitrogênio
 - 4.3. Saídas de nitrogênio
5. **Desafios e Medidas para Minimizar os Impactos Sob o Ciclo do Nitrogênio no Antropoceno**
6. **Considerações Finais**

1. Introdução

Em ecossistemas naturais terrestres, o nitrogênio (N) é um elemento essencial para o

desenvolvimento das plantas. Na forma molecular como N₂, é o elemento mais abundante da atmosfera, porém somente está disponível para as plantas quando em formas reativas, principalmente nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺),¹ e em menor importância em

formas orgânicas.² Ao contrário dos demais nutrientes, o N tem grande mobilidade no sistema solo-planta-atmosfera em função dos processos que alteram sua valência química, e consequentemente formas no ambiente. Por isso, desequilíbrios provocados por ações antrópicas podem mudar a intensidade desses processos e levar a impactos negativos no ambiente, tal como acidificação, eutrofização e perda de biodiversidade.³

O Antropoceno é marcado por grandes mudanças ambientais, sociais e econômicas a partir de 1950, conhecido como a “Grande Aceleração”.⁴⁻⁶ Fortemente marcado também pela influência do homem no equilíbrio biogeoquímico do Sistema Terra.^{4,7} Essa época de intensa ação antrópica trouxe bons resultados como o crescimento econômico no setor agrícola, mas também promoveu danos ambientais ao planeta terra, como alterações na ciclagem de importantes nutrientes como o N, esse efeito pode ser visto no aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) como o N₂O.^{5,6,8,9}

Durante todo o Antropoceno as áreas de florestas foram dando lugar para o crescimento das civilizações. A revolução agrícola, foi um importante marco para o aumento do desmatamento.⁶ Durante esta revolução as florestas cobriam a nível global em torno de 6 bilhões ha, em 1998 essa área tinha diminuído para cerca de 4 bilhões ha, a maior parte dessa perda ocorreu nos últimos 50 anos do século XX.¹⁰ Segundos dados mais recentes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO)¹¹ estima-se que somente 31 % da superfície terrestre ainda estejam cobertas por florestas, sendo que a maior parte ocorre em regiões tropicais e as principais causas do desmatamento são a abertura de novas áreas para produção agrícola, urbanização e retirada de madeira.

Por outro lado, a necessidade cada vez maior de um contínuo suprimento de produtos de origem florestal, como madeira, lenha e celulose, aliado a crescente preocupação com a preservação ambiental, impulsionou o aumento dos plantios florestais que em parte contribuem para compensar a

ocupação das áreas nativas. Entre 2000 e 2010, aproximadamente 130 milhões ha de florestas foram perdidos no mundo, no entanto devido às atividades de reflorestamento com espécies nativas e/ou exóticas uma área de 78 milhões ha foram recuperados.¹²

No Brasil, os plantios florestais são majoritariamente dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* em menor percentagem, espécies exóticas que vem sendo utilizadas, principalmente, para fins industriais, mas também para recomposição de áreas desmatadas. Embora sejam árvores, essas espécies modificam a dinâmica de deposição e decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) em relação ao observado originalmente,¹³ afetando o ciclo dos nutrientes, como o do N, com possíveis impactos ambientais. Essa preocupação é pertinente tendo-se em conta que a expansão de florestas comerciais é uma realidade no Brasil, e sem dúvida contribui para reduzir a pressão sobre florestas nativas, porém ainda não é claro o quanto modificam a dinâmica de nutrientes, em especial o N.

Desta forma, o objetivo deste artigo de revisão é descrever as alterações no ciclo do N com as mudanças de uso da terra ocorridas no Antropoceno em áreas de florestas tropicais nativas brasileiras, destacando-se o uso com plantações de eucalipto.

2. Antropoceno: Reflexos sob Sistemas Florestais Naturais e Antrópicos

2.1. Florestas tropicais naturais

O Brasil apresenta uma grande diversidade de ecossistemas florestais, dada a sua extensa área física, sua diversidade de climas e de solos. As florestas tropicais e subtropicais brasileiras são constituídas pela Floresta Amazônica, Floresta Atlântica e Florestas de Planalto.¹⁴ Segundo Ministério do Meio Ambiente,¹⁵ a Floresta Amazônica é a maior

floresta tropical úmida do mundo e ocupa uma área estimada de 325 milhões de hectares.

Por apresentarem uma alta diversidade florística, a serrapilheira de florestas tropicais é altamente diversificada, conseqüentemente a comunidade de microrganismos também é diversa. Regiões com florestas tropicais apresentam clima bem definido, com estações de seca e de chuva, elevadas temperaturas e umidade. Essas características promovem uma intensificação na atividade microbiana, contribuindo para um aumento nas taxas de decomposição e mineralização da MOS.¹⁶⁻¹⁸

Florestas tropicais possuem denso dossel criando uma barreira física de proteção do solo. As copas densas das árvores amortecem o impacto das gotas da chuva favorecendo uma maior infiltração da água no solo e reduzindo a ocorrência de erosões no solo.^{19,20} Solos florestais por não passarem por nenhum tipo de manejo, apresentam melhores condições de porosidade, que facilita a infiltração da água, a recarga dos lençóis freáticos e ainda, influência nos estoques e perdas de N via lixiviação e/ou erosão do solo.²¹

O Antropoceno é marcado por atividades que contribuíram para as mudanças na estrutura e funcionamento do planeta Terra.⁴ Uma dessas atividades é o desmatamento. Todos os benefícios ambientais promovidos pela floresta acabam sendo prejudicados em função do desmatamento. Essa prática acarreta diversos problemas ambientais e sociais, como a perda de biodiversidade, alteração no ciclo hídrico, o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a diminuição de territórios de populações tradicionais.²²⁻²⁴

Segundo Fearnside,²⁵ incentivos fiscais dados para grandes fazendeiros entre 1970 e 1980, período este já no Antropoceno, resultou no aumento do desmatamento na região da Amazônia brasileira. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio de imagens via satélite, monitora o desmatamento em várias regiões do Brasil,

principalmente na Amazônia Legal. Dados recentes mostram uma redução no desmatamento na região da Amazônia Legal. Em 2004 a taxa de desmatamento foi de 27.772 km² já em 2017 essa taxa se reduziu para 6.947 km², uma variação de -75 % na taxa de desmatamento.²⁶ Essa diminuição também é resultado do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) do Ministério do Meio Ambiente.²⁷ Em 2005, as ações do PPCDAm mostraram uma redução da taxa anual do desmatamento de 20.000 km² para o atual que varia entre 6.000 – 7.000 km². Percentual este menor que o considerando com média de referência da Política Nacional de Mudança do Clima, de 19.625 km² (período de 1996 a 2005).²⁷

A região de Mata Atlântica também vem mostrando bons resultados no que diz respeito à redução do desmatamento de florestas nativas. A Fundação SOS Mata Atlântica em parceria com o INPE, desde 1985 realizam um monitoramento dos 17 estados que fazem parte do bioma Mata Atlântica. Dados do último relatório técnico de Remanescentes Florestais da Mata Atlântica período 2016-2017 relatou uma queda no desmatamento de 56,8 % em relação ao período anterior (2015-2016), o que significa que no ano de 2017 foram desmatados 125,62 km² do bioma e, entre 2015 e 2016, o desmatamento foi de 290,75 km².²⁶

2.2. Plantações de eucalipto

Para expansão das atividades agropecuárias na época da chamada “Grande Aceleração”, muitas áreas de floresta nativa foram desmatadas, porém, com as mudanças no código florestal brasileiro (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012)²⁸ e com uma maior fiscalização e monitoramento nas florestas pelos órgãos responsáveis, o desmatamento ilegal vem sendo reduzido.

No entanto, para que muitos produtores rurais ou empresas pudessem regularizar sua

situação perante as novas leis ambientais e/ou cumprir seu passivo ambiental, áreas nativas que foram derrubadas estão sendo recuperadas e reflorestadas com espécies regionais ou exóticas de rápido crescimento como é o caso do eucalipto.

A floresta plantada atualmente é vista com novos olhos. Além de contribuir com a recuperação de áreas degradadas e trazer renda direta e indireta aos produtores e empresas florestais, o plantio de floresta contribui para redução na pressão sobre as florestas nativas.²⁹

O país com maior participação em área global de floresta plantada é a China com 27,27 % do seu território ocupado, já o Brasil ocupa o 9º lugar com cerca de 2,67 %. Estima-se que 76 % destas plantações são destinadas para a produção de madeira.³⁰ No Brasil, segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE,³¹ a área de floresta plantada é de 99.000 km², destes, 74,9 % é ocupado por plantação de eucalipto. O Brasil liderou o ranking global de produtividade florestal em 2015, com produtividade média dos plantios de eucalipto de 36 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.³²

O gênero *Eucalyptus* spp pertence à família Myrtaceae com cerca de 600 espécies.³³ De origem Australiana, as mudas de eucalipto foram trazidas em 1903, pelo pioneiro Edmundo Navarro de Andrade.³⁴ Apesar de ser uma espécie exótica, o eucalipto apresentou uma boa adaptação ao clima tropical brasileiro, aliado a avançada tecnologia da silvicultura, contribuiu para a elevação da produtividade nacional de madeira, sendo maior que as de muitos países de clima temperado.³⁵

No Brasil, florestas plantadas de eucalipto têm sido largamente utilizadas na prática de recuperação de áreas degradadas.³⁶ Essas florestas promovem benefícios ao ecossistema tais como, regulação do ciclo hídrico, sequestro de carbono e conservação da biodiversidade local.³⁷ Nas indústrias, o eucalipto é utilizado para a produção de madeira para serraria, mourões, postes,

energia, celulose, laminados e extração de óleos e resinas.^{38,39}

Desta forma, o plantio de florestas contribui para diminuição na retirada de madeira de áreas naturais, e aumenta o fornecimento de madeira, fibra, combustível e produtos florestais não madeireiros de áreas de florestas plantadas.²⁹

3. Nitrogênio: Funções e Importância

O N foi descoberto em 1772 pelo médico e químico Daniel Rutherford. É um macronutriente essencial para o funcionamento do metabolismo dos seres vivos, pois é necessário para a formação de diversas moléculas como, adenosina trifosfato (ATP), ácidos nucleicos (DNA e RNAs), aminoácidos, proteínas entre outros.⁴⁰⁻⁴⁴

O N na litosfera encontra-se distribuído nas rochas, nos sedimentos e no fundo dos oceanos, representando 98 % do N existente.⁴⁰ Já na atmosfera terrestre, 78 % dos gases correspondem ao N em sua forma molecular diatômica (N₂).⁴⁰ O óxido nitroso (N₂O) é a segunda forma de N mais abundante na atmosfera possuindo um tempo de meia-vida de 130 a 150 anos.⁴⁵

Os processos de ciclagem de nutrientes, acúmulo e decomposição da MOS, são responsáveis pelo equilíbrio existente dos ecossistemas naturais.⁴⁶ A ciclagem do N no ecossistema terrestre é fortemente influenciada pelas características físicas e químicas da área tais como, qualidade do solo, quantidade e tipo de serrapilheira, vegetação, microrganismos, água, temperatura e O₂.⁴⁷⁻⁴⁹

Embora o N seja um elemento abundante na atmosfera, o seu uso pelas plantas é muito limitado, pois só conseguem absorver o N nas formas dos íons amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻).^{50,51} A transformação do N₂ molecular nesses íons inorgânicos ocorre pela reação química chamada de fixação de N que pode acontecer por fontes naturais ou industrial.⁵¹ A ciclagem do N envolve três etapas, a primeira de

entrada do N no ecossistema terrestre, sua transformação e por último sua saída.

O N_2 pode ser fixado na atmosfera antes de ser transportado para o ecossistema terrestre, por meio da ação de relâmpagos. Essa fixação ocorre pela dissociação térmica do O_2 por descargas elétricas.⁵⁰ Já a entrada de N no ecossistema terrestre pode ser, via deposição

atmosférica, fixação biológica de N (FBN) e aplicação de fertilizantes nitrogenados, e ainda sua transformação ocorre via decomposição da MOS, da mineralização, dos processos de nitrificação e desnitrificação e, as saídas do N retornando para atmosfera podem ser via emissão de óxidos de N (N_2O , NO) e emissão de N_2 (Figura 1).^{16,49,52,53}

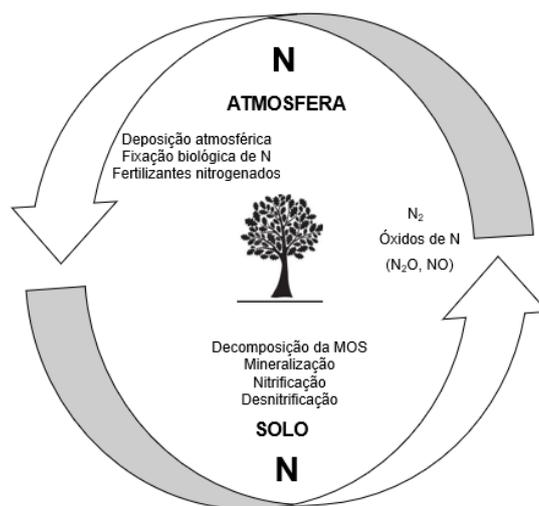


Figura 1. Ciclagem do N no sistema terrestre

A entrada do N via deposição atmosférica é constituída pelas formas úmidas e secas, que juntas são chamadas de deposição total (*bulk deposition*).⁵⁴ A forma úmida compreende a retirada dos gases e das partículas atmosféricas, tais como NH_4^+ , NO_3^- , nitrogênio orgânico dissolvido (NOD) via precipitação, neblina e neve.⁵⁵ A deposição seca é constituída pela deposição de gases (NH_3 ; HNO_3) e de partículas atmosféricas chamadas de aerossóis, tais como: sulfato de amônio ($(NH_4)_2 SO_4$) e nitrato de amônio (NH_4NO_3). Os aerossóis possuem composições, concentrações e formas diferentes, podendo ser desde poeira do deserto até poluição urbana e, a velocidade de deposição vai depender do tamanho das partículas.^{56,57}

A fixação biológica do N (FBN) ocorre pela associação simbiótica entre plantas leguminosas e grupos específicos de bactérias diazotróficas, por associações não simbióticas, normalmente por bactérias presentes na

rizosfera ou mesmo endofíticas, e a FBN em microrganismos de vida-livre. O grupo dos rizóbios (*Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* entre outros) é o mais conhecido entre as bactérias fixadoras de N, contribuindo largamente para a nutrição nitrogenada de leguminosas como o feijoeiro, a soja, a ervilha entre outras. O gênero *Azospirillum* é exemplo de bactéria comum na rizosfera das plantas capaz de fixar N_2 , além de produzir hormônios que estimulam o crescimento de raízes. Além das bactérias, o gênero *Frankia* é um actinomiceto capaz de nodular as casuarinas, mostrando a ampla diversidade de diazotróficos na natureza.^{16,49,58}

A FBN compreende uma reação de redução catalisada pela enzima nitrogenase, que realiza a quebra da tripla ligação do N_2 produzindo o NH_3 , molécula que é rapidamente incorporada como aminoácido pela planta no caso dos sistemas

simbióticos.⁵⁹ As plantas que não realizam simbiose com bactérias diazotróficas, assimilam N através dos íons de NH_4^+ excretados no meio pelas bactérias.⁴⁹

Uma vez incorporado na forma orgânica, o N volta a ficar disponível para as plantas via o processo de amonificação (mineralização), que é a conversão do N orgânico em NH_4^+ .⁴⁰ Nesse processo, os organismos decompositores do solo que possuem enzimas extracelulares como a celulase, protease e a urease causam a degradação da MOS tornando o N orgânico dissolvido e em seguida convertendo à íons de NH_4^+ , que pode ser assimilado pelas plantas ou ainda imobilizado (absorção) pelos microrganismos.^{60,61}

A fonte antrópica de N para o solo é por meio da fertilização nitrogenada.^{62,63} Os dados do IBGE,³¹ relatam que o fertilizante nitrogenado mais utilizado pelos agricultores é a ureia, seguido do sulfato de amônio e do nitrato de amônio, com produção em 2014 de 830, 302 e 278 mil toneladas respectivamente. Visando uma maior produtividade, muitos produtores aplicam uma quantidade maior que o necessário de fertilizantes nitrogenados e isto pode contribuir para o aumento das perdas de N no meio ambiente nas formas de NH_3 , NH_4^+ , óxidos de nitrogênio (NO_x), N_2O e NO_3^- .⁶⁴ No setor de mudança do uso da terra, as práticas de manejo e os sistemas de irrigações inadequados para a área, são responsáveis por alterações nas propriedades físicas do solo e, essas alterações podem promover a perdas de nutrientes, como a perda de NO_3^- via lixiviação.^{48,65}

Toda essa mudança de uso que o solo é submetido acaba por alterar e prejudicar a ciclagem de muitos nutrientes, principalmente do N. Sendo sua ciclagem intensamente influenciada pelas características físicas e químicas do ecossistema local. Visto isso, o tópico a seguir abordará a influência da mudança do uso da terra no Antropoceno, e como essas mudanças podem alterar a ciclagem do N em áreas de florestas nativas tropicais e em áreas com florestas plantadas de eucalipto.

4. Mudanças do uso da Terra no Antropoceno: Influências Sob a Ciclagem do Nitrogênio

4.1. Entradas de N

Como já relatado, as formas de entrada de N ao ecossistema terrestre podem ser por meio da deposição atmosférica (úmida ou seca), fixação biológica ou ainda por aplicação de fertilizantes nitrogenados. Essas formas de entrada de N no sistema terrestre têm sido submetidas a diversas alterações, segundo Galloway e colaboradores,⁶⁶ a produção de alimentos e energia tem sido o impulsionador para a alteração do ciclo N e isso é o reflexo do disparado crescimento populacional do Antropoceno.

Dados do último relatório das Organizações da Nações Unidas (ONU),⁶⁷ relata que a população mundial triplicou de 1950 até meados de 2017, período da chamada a “Grande Aceleração”.⁴ A população que era de 2,5 bilhões de habitantes em 1950 saltou para 7,5 bilhões em 2017. Segundo estimativas da ONU, a população mundial aumentará pouco mais de um bilhão de pessoas nos próximos 13 anos, chegando a 8,6 bilhões em 2030, e aumentará ainda mais em 2050 com 9,8 bilhões e 11,2 bilhões até 2100.⁶⁷

Tendo em vista este cenário, fica a pergunta “Como o setor industrial e agropecuário conseguirão acompanhar esse crescimento populacional, fornecendo produtos (alimentícios/não alimentícios) de qualidade sem que haja aumento no desmatamento e emissão de GEE e ainda consiga trabalhar de forma sustentável para atender toda essa demanda?”.

O uso de sistemas consorciados de produção entre espécies fixadoras de N (leguminosas) e não fixadoras possibilitam o aumento nos estoques de N e C no solo e também da redução das emissões de GEE.⁶⁸ Santos e colaboradores,⁶⁹ observaram que os tratamentos consorciados (eucalipto+acácia)

apresentaram maiores teores de N na serrapilheira em relação aos monocultivos de eucalipto, com teores de 225 kg N ha^{-1} , contra uma média de 115 kg N ha^{-1} respectivamente. Esses resultados mostram que sistemas consorciados podem contribuir para o aumento dos estoques de nutrientes no solo, principalmente do N e este pode colaborar para reduzir as quantidades de adubos aplicado na área. Segundo Cooper & Scherer,⁶⁸ bactérias fixadoras de N do grupo Cyanobactéria que são encontradas nas superfícies das folhas em área de floresta tropical podem fixar cerca de $90 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Assim como o N aplicado via fertilizante, o N que entra no sistema terrestre via deposição atmosférica também vem apresentando alterações no período do Antropoceno. O aumento da urbanização e industrialização, acarreta num incremento nas emissões e deposições de N para as regiões tropicais do planeta.^{57,66,70}

Allen e colaboradores,⁵⁷ estimaram o fluxo de deposição seca de partículas nitrogenadas atmosféricas de áreas próximas a cultivos de cana-de-açúcar no sudeste do Brasil. Para área de floresta tropical os fluxos de deposição seca foram de $0,54$ e $8,04 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o NH_4^+ e NO_3^- respectivamente, já para as regiões mais afastadas dos canais e com floresta de eucalipto e pinus, o fluxo de NH_4^+ foi $0,28 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e de $2,89 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para NO_3^- . Os autores reforçam que a queima de biomassa oriunda da cana-de-açúcar é uma das causas responsáveis pela deposição de aerossóis atmosféricos nas áreas rurais do sudeste brasileiro.

Souza e colaboradores,⁷⁰ observaram uma deposição total anual de N maior nas áreas costeiras, área mais próxima ao perímetro urbano, com $17,2$ e $15,4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, contra $15,1$ e $12,1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em áreas de floresta, que se encontram mais distante do perímetro urbano.

4.2. Acúmulo de serrapilheira e estoques de N

A serrapilheira é a principal fonte de nutrientes para o solo, e a ciclagem e disponibilidade desses nutrientes estão fortemente ligadas as condições do ecossistema local,^{71,72} além de serem fortemente afetadas pela ação antrópica. Essa ação pode causar alterações nos ciclos biogeoquímicos, como do N e, acabam por prejudicar a disponibilidade desses nutrientes para o solo e para a planta.^{40,66}

Visto a importância da serrapilheira para a disponibilidade de nutrientes para o solo e para a planta, trabalhos relacionados com a avaliação das quantidades de serrapilheiras e teores de nutrientes, principalmente do N estão cada vez mais sendo realizados. Vital e colaboradores,⁷² observaram a ciclagem de nutrientes em uma vegetação da Mata Atlântica, cuja produção de serrapilheira foi de $10.647 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ já, o retorno dos macronutrientes dessa serrapilheira foi de 521 kg ha^{-1} e destes 218 kg ha^{-1} correspondia ao N.

Resultados semelhantes foram encontrados por Pinto e colaboradores,⁷³ ao trabalharem em áreas com estágio de crescimento diferentes. Na floresta em estágio inicial, a produção anual de serrapilheira foi de 6.310 kg ha^{-1} e o conteúdo de N foi de $137 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Já na vegetação madura, a produção de serrapilheira e o conteúdo de N foram maiores, com $8.800 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Valores próximos também foram observados em uma Floresta Ombrófila Mista Montana.⁴⁷ Os autores relataram um acúmulo médio de serrapilheira de $8000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ desses, o conteúdo médio de N foi de $96 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Já em uma área de Floresta Ombrófila Densa, foi observado um acúmulo de serrapilheira em povoamento de eucalipto de $13.500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e na mata nativa de $10.100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.⁷⁴ Os autores explicam que esse maior acúmulo de serrapilheira no eucalipto possivelmente está relacionado a baixa qualidade nutricional da serrapilheira o que promove menores taxas de decomposição. A serrapilheira de eucalipto apresenta maiores

relações de C/N, lignina/N e (lignina + celulose) /N ocasionando uma lenta decomposição do resíduo vegetal.⁷⁴ Além disso, a idade da vegetação, a taxa de crescimento, as condições climáticas e as propriedades do solo também influenciam nos processos de decomposição da serrapilheira,^{75,76} isso explica os menores teores de N encontrados na serrapilheira do eucalipto que foram de 165 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ contra 229 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ na serrapilheira mata. Em contrapartida, o tempo de permanência do N na serrapilheira de mata nativa é menor em virtude da maior taxa de mineralização que ocorre nessas áreas.

Maiores resultados foram encontrados por Gama-Rodrigues e colaboradores,³⁹ onde o acúmulo de serrapilheira foi de 37.600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e 22.500 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para uma área de plantio de eucalipto e de floresta de Mata Atlântica respectivamente. Já os teores de N total na serrapilheira foram maiores na mata, com valores de 377 e 304 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ para o povoamento de eucalipto. Esse maior acúmulo de serrapilheira no povoamento de eucalipto possivelmente está relacionado com a relação C/N de 62 contra 30 da mata nativa. Segundo O'Connell e Sankaran,⁷⁵ em determinados locais da América do Sul, a serrapilheira acumulada em florestas tropicais podem variar de 3.000 a 16.500 kg ha⁻¹.

Rangel & Silva,⁷⁷ ao trabalharem sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo encontraram valores estatisticamente iguais nos estoques de N no solo para as áreas de floresta nativa e plantio de eucalipto. Na profundidade de 0-10 cm os estoques foram de 2790 kg N ha⁻¹ para mata nativa e 2510 kg N ha⁻¹ para o plantio de eucalipto. Já na profundidade de 0-40 cm os estoques de N foram maiores com 7980 e 8890 kg N ha⁻¹ para a mata nativa e o plantio de eucalipto respectivamente.

O tipo de solo também pode contribuir para maiores estoques de N no solo. Plantações de eucalipto em áreas de solos argilosos conseguem absorver maiores quantidade de N devido ao maior estoque de N e MOS.^{36,78} Esse comportamento foi observado por Eaton,⁷⁹ ao trabalhar em área

de floresta subtropical com solos com altos teores de argila. O autor observou que no período de chuva, os solos apresentaram um incremento no C orgânico e na taxa de nitrificação. O mesmo sugere que essa matéria orgânica em decomposição estava adsorvida à argila do solo tornando-se disponíveis a comunidade microbiana por um longo período de tempo.

4.3. Saídas de N

O ciclo do N é fechado com o retorno do N para atmosfera. Porém, assim como as demais etapas do ciclo do N, em virtude do aumento das atividades antrópicas e crescimento populacional no Antropoceno,⁶ esse retorno do N para atmosfera não está ocorrendo de forma equilibrada, pelo contrário, está havendo um aumento nas perdas de N principalmente na forma do gás N₂O.

Desde o século XIX, a produção de energia e alimentos vêm aumentando não apenas as emissões de C, mas também de N para atmosfera, onde, a queima de combustíveis fósseis é o principal emissor de óxidos de N (NO_x = NO + NO₂).^{53,55,64} Além dos combustíveis fósseis, o uso de fertilizantes sintéticos, a queima de biomassa e de resíduos de animais também são responsáveis por aumentar as perdas de N via volatilização da NH₃.^{53,64,80,81}

A substituição da mata nativa por outras culturas altera as condições físicas e químicas do solo,⁸² esse fato resulta na mudança da estrutura do solo podendo alterar a atividade microbiana do solo e aumentar as emissões de GEE. Solos que sofrem intenso revolvimento podem ter sua estrutura modificada, tornando-os mais compactados criando assim condições com baixas concentrações de O₂, ambiente propício para a ocorrência do processo de desnitrificação, responsável pela produção e emissão de N₂O para atmosfera.^{40,83}

Os processos de nitrificação e desnitrificação são os responsáveis pela produção de N₂O, e estes podem ser

acelerados em função da temperatura e da saturação do solo por água. Segundo Neill e colaboradores,⁸⁴ em solos florestais, as emissões de N_2O são baixas quando o solo possui < 30 % do espaço poroso preenchido por água, em contrapartida, quando a saturação do solo é > 30 % essa emissão de N_2O para atmosfera é aumentada. O pH do solo também pode alterar a produção de N_2O , quando o pH está acima de 5,5 predomina o processo de nitrificação, já quando o solo apresenta um pH entre 4 e 5,5 o processo que ocorre é o de desnitrificação.⁴⁰

As emissões de N_2O podem variar de uma cultura para outra. Coutinho e colaboradores,⁸² avaliaram a emissão de N_2O em área de pastagem que foi substituída por mata secundária e plantação de eucalipto. Os maiores fluxos foram observados na área de mata, onde também foram encontradas as maiores concentrações de NO_3^- . Os fluxos de N_2O na mata e no eucalipto foram de 0,560 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$ e 0,422 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$, respectivamente. Os autores explicam que essa maior emissão na mata está associada a qualidade da serrapilheira, que por apresentar menor relação C/N, a mineralização da MOS é mais rápida resultando em maiores teores de NO_3^- e consequentemente um incremento na emissão de N_2O do solo.

Já em um trabalho de revisão sobre as emissões de N_2O em solos da floresta Amazônica, foi observado uma variação nas emissões entre 1,4 e 2,4 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$.⁸⁵ Em termos mundiais, os autores relatam, que as emissões de N_2O em florestas tropicais podem variar de 0,3 a 6,7 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$. Valores semelhantes de N perdido via N_2O foram encontrados em diferentes sistemas de plantios em uma região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia.⁸⁶ Os maiores picos de emissão de N_2O foram relatados na estação chuvosa, onde as emissões foram de forma crescente nos tratamentos de eucalipto, seguido da pastagem, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e lavoura, com uma emissão média acumulada de 0,165; 0,298; 0,367 e 1,401 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$ respectivamente.⁸⁶ Fialho,⁸⁷ também avaliou a

emissão de N_2O solo sob áreas de plantios de eucalipto. O trabalho foi realizado em três regiões distintas e sob diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados. A emissão média de N_2O nas três regiões foi de 1,22 kg N $ha^{-1} ano^{-1}$.

Outra forma de perda da N para atmosfera é via volatilização da amônia, e este fato está vinculado a aplicação de fertilizantes, principalmente ureia. Quando a ureia é aplicada no solo e sem incorporação, a mesma sofre processo de hidrólise, e o N pode ser perdido por meio da volatilização da NH_3 .⁸⁸ Porém, em plantações de eucalipto, os fertilizantes mais recomendados são aqueles que possuem em sua composição os elementos NPK e, o adubo com a fonte de N via sulfato de amônio é o mais recomendado.³⁸

O uso inadequado dos fertilizantes também contribui para a perda de N do solo via lixiviação. Entre os íons que são lixiviados mais facilmente está o NO_3^- .⁸⁹ Sua fácil lixiviação ocorre porque este íon não é adsorvido pelos componentes das frações do solo, facilitando seu deslocamento na solução do solo, podendo ser absorvidos pelas raízes das plantas e translocadas às folhas ou ainda, podem ser perdidas por lixiviação para os lençóis freáticos mais profundos.^{90,91} Segundo Gonçalves,³⁸ a maioria das áreas de reflorestamento com eucalipto estão sob solos com altos níveis de intemperização e lixiviação, consequentemente, solos pobres em nutrientes. A lixiviação em áreas de eucalipto pode estar atrelada ao fato de as copas das árvores terem pouca área foliar em comparação a mata nativa, permitindo assim que mais água da chuva atinja o solo, acarretando maior erosão e perda de nutrientes pela lixiviação.⁹²

Com objetivo de avaliar essa perda de N via lixiviação do NO_3^- Silva e colaboradores,⁷⁸ monitoraram um povoamento de eucalipto que recebeu 80 kg N ha^{-1} de NPK (adubo que contém nitrogênio, fósforo e potássio). Os autores observaram que no primeiro ano após o plantio houve uma perda de N- NO_3^- via lixiviação de 32 kg $ha^{-1} ano^{-1}$. Já no segundo

ano após o plantio a quantidade de $N-NO_3^-$ perdido foi de $8,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esse resultado colabora com a conclusão de Denk e colaboradores,⁵⁹ como o NO_3^- não é adsorvido pelos argilominerais do solo ele pode ser facilmente perdido pelos processos de lixiviação do solo.

Os resultados de todos esses trabalhos apontam para a corroboração da hipótese de que as mudanças que o planeta vem passando no Antropoceno em relação à sua estrutura e funcionamento estão refletindo para alterações dos ciclos biogeoquímicos, principalmente no ciclo do N.

5. Desafios e Medidas para Minimizar os Impactos Sob o Ciclo do Nitrogênio no Antropoceno

O investimento em pesquisa, monitoramento e fiscalização no setor de mudança do uso da terra e florestas é imprescindível para que o país possa crescer de forma sustentável, e uma das estratégias que o Brasil criou para minimizar os impactos sobre o ciclo do N por meio da redução das emissões de GEE visando também a sustentabilidade dos setores foi a criação do “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura”, também denominado de “Plano ABC” (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Esse plano foi criado para que o Brasil consiga cumprir com o compromisso voluntário que ele assumiu na 15ª Conferência das Partes (COP 15) que ocorreu em 2009 em Copenhague na Dinamarca.⁹³

O compromisso que o Brasil assumiu foi o de reduzir de 36,1 % a 38,9 % das emissões de GEE entre eles o N_2O até 2020, essa porcentagem equivale uma redução em torno de um bilhão de toneladas de CO_2 equivalente. Para que o país consiga atingir essa meta o Plano ABC é composto por sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação que são: Recuperação de Pastagens

Degradadas; Integração Lavoura-Pecuária-Floresta; Sistema Plantio Direto; Fixação Biológica de Nitrogênio; Tratamento de Dejetos Animais e Florestas Plantadas e ainda um programa com as ações de adaptação às mudanças climáticas.⁹³

O Brasil está entre os países que mais se preocuparam em participar e colaborar com as discussões internacionais referente a mudanças climáticas, como ocorreu na 21ª Conferência das Partes (COP21) também conhecida como Acordo de Paris que ocorreu em 2015 na França, na cidade de Paris. Segundo o Ministério do Meio Ambiente,⁹⁴ após a ratificação do Acordo pelo Congresso Nacional em setembro de 2016, as metas brasileiras de redução das emissões de GEE deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais. Sendo assim, a NDC (Contribuições Nacionalmente Determinadas) assumidas pelo Brasil foi de reduzir as emissões de GEE em 37 % abaixo dos níveis de 2005, em 2025, e ainda reduzir as emissões de GEE em 43 % abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18 % até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45 % de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Nessa mesma conferência, o Brasil anunciou sua Estratégia Nacional para REDD+, a ENREDD+. O REDD+ é um instrumento econômico desenvolvido no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), da qual o Brasil é membro. O objetivo desse instrumento é fornecer incentivos financeiros a países em desenvolvimento por seus resultados no combate ao desmatamento e à degradação florestal e na promoção do aumento de cobertura florestal.⁹⁵ O ENREDD+ tem como objetivo geral contribuir para a mitigação da mudança do clima por meio da eliminação do desmatamento ilegal, da conservação e da recuperação dos ecossistemas florestais e do desenvolvimento de uma economia florestal

sustentável de baixo carbono, gerando benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Esses compromissos assumidos pelo governo brasileiro perante a sociedade internacional na UNFCCC aliadas as fiscalizações e monitoramento realizado pelo Ministério do Meio Ambiente em parceria com o INPE e o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação das áreas de florestas nativas brasileira, são medidas que juntas, podem minimizar os danos que a crescente urbanização e industrialização do Antropoceno estão causando para o sistema terrestre, prejudicando e alterando os ciclos biogeoquímicos, principalmente do nitrogênio.

6. Considerações Finais

O nitrogênio é o elemento que possui um dos ciclos mais complexos no meio ambiente, e a mudança do uso do solo é um dos fatores que mais contribui para a alteração da sua ciclagem no ecossistema terrestre. A retirada da mata nativa para implantação de outra cultura como do eucalipto acaba por alterar as condições físicas, químicas e principalmente biológicas do solo, sendo esse último de extrema importância para os processos de decomposição e mineralização da MOS, conseqüentemente para a ciclagem dos nutrientes.

As áreas de mata apresentam maiores emissões de N₂O em relação a plantios de eucaliptos, porém, esse fato está atrelado a maior qualidade, diversidade e quantidade de vegetação quando comparado ao um monocultivo, como do eucalipto, porém isso não quer dizer que se deve retirar a floresta e plantar eucalipto, pelo contrário, a floresta apesar da forte pressão do desmatamento que passam no Antropoceno, exercem importante papel no sequestro de CO₂ reduzindo assim grandes concentrações de GEE da atmosfera contribuindo para amenizar futuros problemas com o desequilíbrio biogeoquímico do Sistema Terrestre.

Conferências como as realizadas pela UNFCCC são de grande valia para que os países que fazem parte desse tratado possam rever seu sistema de produção (energético, agrícola, industrial etc) e como eles podem contribuir para reduzir as emissões de GEE no Antropoceno. O setor de mudança de uso do solo e floresta são grandes responsáveis por essas emissões, e o investimento em tecnologias sustentáveis que contribuam para diminuir os danos ambientais causados pelas inadequadas práticas de manejo são de suma importância para mitigação das emissões desses gases.

Referências Bibliográficas

¹ Martinelli, L. A. Os caminhos do nitrogênio – do fertilizante ao poluente. *Informações Agrônomicas* **2007**, *118*, 6. [Link]

² Jones, D. L.; Healey, J. R.; Willett, V. B.; Farrar, J. F.; Hodge, A. Dissolved organic nitrogen uptake by plants - an important N uptake pathway? *Soil Biology and Biochemistry* **2005**, *37*, 413. [CrossRef]

³ Vitousek, P. M.; Aber, J. D.; Howarth, R. W.; Likens, G. E.; Matson, P. A.; Schindler, D. W.; Schlesinger, W. H.; Tilman, D. G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* **1997**, *7*, 737. [CrossRef]

⁴ Steffe, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* **2015**, *2*, 81. [CrossRef]

⁵ Moreira Júnior., D. P.; Silva, C. M.; Bueno, C.; Corrêa, S. M.; Arbilla, G. Determinação de Gases do Efeito Estufa em Cinco Capitais de Diferentes Biomas Brasileiros. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 2032. [CrossRef]

⁶ Silva, C. N.; Arbilla, G. Antropoceno: Os desafios de um Novo Mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*. [Link]

⁷ Silva, C. M.; Arbilla, G.; Soares, R.; Machado, W. A Nova Idade Meghalayan: O que isso Significa para a Época do Antropoceno?

- Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1648. [CrossRef]
- ⁸ Crutzen, P. J. Geology of mankind. *Nature*, **2002**, *415*, 23. [CrossRef]
- ⁹ Lopes, I. M.; Pinheiro, E. F. M.; Lima, E.; Cedia, M. B.; Campos, D. V. B.; Alves, B. J. R. Emissões de N₂O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1930. [CrossRef]
- ¹⁰ Van, P. N. & Azomahou, T. Nonlinearities and heterogeneity in environmental quality: an empirical analysis of deforestation. *Journal of Development Economics* **2007**, *84*, 291. [CrossRef]
- ¹¹ FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. State of the World's Forests 2012. [Link]
- ¹² FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Forest Resources Assessment 2010. [Link]
- ¹³ Barbosa, V.; Barreto-Garcia, P.; Gama-Rodrigues, E.; Paula, A. Biomassa, Carbono e Nitrogênio na serapilheira acumulada de Florestas Plantadas e Nativa. *Floresta e Ambiente* **2017**, *24*. [CrossRef]
- ¹⁴ Leitão Filho, H. F. Considerações sobre a florística de florestas tropicais e sub-tropicais do Brasil. *Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais* **1987**, *35*, 41. [Link]
- ¹⁵ Ministério do Meio Ambiente, Serviço Florestal Brasileiro. Florestas do Brasil em resumo - 2013: dados de 2007-2012. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/publicacoes/572-florestas-do-brasil-em-resumo-2013>> . Acesso em: 20 agosto 2008.
- ¹⁶ Chapin III, F. S.; Matson, P. A.; Mooney, H. A.; *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag New York, 2002.
- ¹⁷ Sanches, L.; Valentini, C. M. A.; Biudes, M. S.; Nogueira, J. S. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serrapilheira em floresta tropical de transição. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2009**, *13*, 183. [CrossRef]
- ¹⁸ Silver, W. L.; Liptzin, D.; Almaraz, M. Soil redox dynamics and biogeochemistry along a tropical elevation gradient. *Ecological Bulletins* **2013**, *54*, 195. [CrossRef]
- ¹⁹ Oliveira Júnior, J. C.; Dias, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. *Revista Árvore* **2005**, *29*, 9. [CrossRef]
- ²⁰ Mendonça, L. A. R.; Vásques, M. A. N.; Feitosa, J. V.; Oliveria, J. F.; Franca, R. M.; Vásques, E. M. E.; Frischkorn, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **2009**, *14*, 89. [CrossRef]
- ²¹ Best, A.; Zhang, L.; McMahon, T.; Western, A.; Vertessy, R. *A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability*. Murray-Darling Basin Commission and CSIRO 2003. [Link]
- ²² Schwartzman, S.; Zimmerman, B. Conservation Alliances with Indigenous Peoples of the Amazon. *Conservation Biology* **2005**, *19*, 721. [CrossRef]
- ²³ Bonan, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* **2008**, *320*, 1444. [CrossRef]
- ²⁴ Caviglia-Harris, J. L. Agricultural Innovation and Climate Change Policy in the Brazilian Amazon: Intensification practices and the derived demand for pasture. *Journal of Environmental Economics and Management* **2018**, *90*, 232. [CrossRef]
- ²⁵ Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates and Consequences. *Conservation Biology* **2005**, *19*, 680. [CrossRef]
- ²⁶ INPE- Instituto de Pesquisas Espaciais. Fundação SOS Mata Atlântica. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica período 2016-2017. Relatório técnico 2018. [Link]
- ²⁷ Ministério do Meio Ambiente. Os planos de prevenção e controle do desmatamento em âmbito federal. Disponível em: <<http://combateadesmatamento.mma.gov.br/>>. Acessado em: 21 agosto 2018.
- ²⁸ Novo Código Florestal. LEI Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em:

- <<http://saema.com.br/files/Novo%20Codigo%20Florestal.pdf>>. Acessado em: 13 outubro 2018.
- ²⁹ Embrapa Florestas. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental 2015. [Link]
- ³⁰ FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest resources assessment 2015. How are the world's forests changing? 2016. [Link]
- ³¹ IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2015. [Link]
- ³² IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2016. [Link]
- ³³ Nogueira, A. C. W. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2007. [Link]
- ³⁴ SNIF – Sistema Nacional de Informações Florestais. As florestas plantadas. 2018. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas>>. Acessado em: 21 agosto 2018.
- ³⁵ Valverde, S. R.; Soares, N. S.; Silva, M. L.; Jacovine, L. A. G.; Neiva, S. A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. *Biomassa & Energia* **2004**, *1*, 393. [Link]
- ³⁶ Gama-Rodrigues, E. F.; Barros, N. F.; Gama-Rodrigues, A. C.; Santos, G. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2005**, *29*, 893. [CrossRef]
- ³⁷ Baral, H.; Guariguata, M. R.; Keenan, R. J. A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services* **2016**, *22*, 260. [CrossRef]
- ³⁸ Gonçalves, J. L. M. Recomendações de Adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Típicas da Mata Atlântica. *Documentos florestais* **1995**, *15*, 1. [Link]
- ³⁹ Gama-Rodrigues, E. F.; Barros, N. F.; Viana, A. P.; Santos, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2008**, *32*, 1489. [CrossRef]
- ⁴⁰ Moreira, F. M. S.; Siqueira, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2ed. Editora UFLA: Lavras, 2006.
- ⁴¹ Krapivin, V. F.; Varotosos, C. A.; *Biogeochemical Cycles in Globalization and Sustainable Development*. Prax ix Publishing Ltda: Chiclester, 2008.
- ⁴² Marques, A. J.; Filgueira, C. A. A química atmosférica no Brasil de 1790 a 1853. *Química Nova* **2010**, *33*, 1612. [CrossRef]
- ⁴³ Soetan, K. O.; Olaiya, C. O.; Oyewole, O. E. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants: A review. *African Journal of Food Science* **2010**, *4*, 200. [Link]
- ⁴⁴ Chitragar, A. A.; Vasi, S. M.; Naduvinamani, S.; Katigar, A. J.; Hulasogi, T. I. Nutrients Detection in the Soil: Review Paper. *International Journal on Emerging Technologies* **2016**, *7*, 257. [Link]
- ⁴⁵ Cónsul, J. M. D.; Thiele, D.; Veses, R. C.; Baibich, I. M.; Dallago, R. M. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. *Química Nova* **2004**, *27*, 432. [CrossRef]
- ⁴⁶ Cardoso, E. L.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Ferreira, M. M.; Freitas, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal Sul-Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2011**, *35*, 613. [Link]
- ⁴⁷ Caldeira, M. V. W. Quantificação de serapilheira e de nutrientes – Floresta Ombrófila Mista Montana – Paraná. *Revista Acadêmica Ciência Animal* **2007**, *5*, 101. [CrossRef]
- ⁴⁸ Johnson, D. W.; Turner, J. Nitrogen budgets of forest ecosystems: A review. *Forest Ecology and Management* **2014**, *318*, 370. [CrossRef]
- ⁴⁹ Rodrigues, R. A. R.; de Mello, W. Z.; da Conceição, M. C. G.; de Souza, P. A.; Silva, J. J. N. Dinâmica do Nitrogênio em Sistemas

- Agrícolas e Florestais Tropicais e seu Impacto na Mudança do Clima. *Revista Virtual Química* **2017**, *9*, 1868. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁰ Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N.; *Atmospheric Trace Constituents in: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2ed., Wiley: Nova Jersey, 2006, cap. 2.
- ⁵¹ Neto, A. A. C.; Silva, P. P. A.; *Nitrogênio: um dos elementos essenciais para as plantas in: VI Botânica no Inverno 2016*. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2016, cap.16.
- ⁵² Luisotto, D. M.; *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, 2013. [[Link](#)]
- ⁵³ Zhu, X.; Zhang, W.; Chen, H.; Mo, J. Impacts of nitrogen deposition on soil nitrogen cycle in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica* **2015**, *35*, 35. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁴ de Souza, P. A.; de Mello, W. Z.; Silva, J. J. N.; Rodrigues, R. A. R.; da Conceição, M. C. G. Deposições Atmosféricas Úmida, Seca e Total de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido no Estado do Rio de Janeiro. *Revista Virtual Química* **2017**, *9*, 2052. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁵ Rodrigues, R. A. R.; de Mello, W. Z.; Souza, P. A. Aporte atmosférico de amônio, nitrato e sulfato em área de floresta Ombrófila Densa Montana na Serra dos Órgãos, RJ. *Química Nova* **2007**, *30*, 1842. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁶ Carvalho Júnior, V. N. Deposição atmosférica e composição química da água de chuva. *Revista Tecnologia* **2004**, *25*, 61. [[Link](#)]
- ⁵⁷ Allen, A. G.; Cardoso, A. A.; Wiatr, A. G.; Machado, C. M. D.; Paterlinia, W. C.; Baker, J. Influence of Intensive Agriculture on Dry Deposition of Aerosol Nutrients. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2010**, *21*, 87. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁸ Hungria, M.; Mendes, I. C.; Mercante, F. M. Tecnologia de fixação biológica de nitrogênio com o feijoeiro: viabilidade em pequenas propriedades familiares e em propriedades tecnificadas. Documentos 338/ Embrapa Soja. 2013. [[Link](#)]
- ⁵⁹ Denk, T. R. A.; Mohn, J.; Decock, C.; Lewicka-Szczebak, D.; Harris, E.; Butterbach-Bahl, K.; Kiese, R.; Wolf, B. The nitrogen cycle: A review of isotope effects and isotope modeling approaches. *Soil Biology & Biochemistry* **2017**, *105*, 121. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁰ Schilesinger, W. H.; Bernhardt, E. S.; *Biogeochemistry – an analysis of global change*, 3ed, Elsevier: Amsterdã, 2013.
- ⁶¹ Schimel, J. P.; Bennett, J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigma. *Ecology* **2004**, *85*, 591. [[CrossRef](#)]
- ⁶² Spiro, T. G.; Stigliani, W. M. *Clima in Química Ambiental*. 2ed. Pearson Prentice Hall: São Paulo, 2009, cap.6.
- ⁶³ Baird, C.; Cann, M. *Energia e Mudanças Climáticas in Química Ambiental* 4ed., Bookman: Porto Alegre, 2011. cap. 6.
- ⁶⁴ Galloway, J. N.; Aber, J. D.; Erisman, J. W.; Seitzinger, S. P.; Howarth, R. W.; Cowling, E. B.; Cosby, B. J. The nitrogen cascade. *BioScience* **2003**, *53*, 341. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁵ Andrade, E. M.; Aquino, D. N.; Crisóstomo, L. A.; Rodrigues, J. O.; Lopes, F. B. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. *Ciência Rural* **2009**, *39*, 88. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁶ Galloway, J.; Naghram, N.; Abrol, Y. P. A perspective on reactive nitrogen in a global, Asian and Indian context. *Current Science* **2008**, *94*, 1375. [[Link](#)]
- ⁶⁷ ONU - Organização das Nações Unidas. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. 2017. [[Link](#)]
- ⁶⁸ Cooper, J. E.; Scherer, H. W. *Nitrogen Fixation in Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2012, Academic Press: Cambridge, cap. 16.
- ⁶⁹ Santos, F. M.; Chaer, G. M.; Diniz, A. R.; Balieiro, F. C. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of Eucalyptus and Acacia on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management* **2017**, *384*, 110. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁰ Souza, P. A.; Ponette-González, A. G.; de Mello, W. Z.; Weathers, K. C.; Santos, I. A. Atmospheric organic and inorganic nitrogen inputs to coastal urban and montane Atlantic

- Forest sites in southeastern Brazil. *Atmospheric Research* **2015**, *160*, 126. [[CrossRef](#)]
- ⁷¹ Selle, G. L. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais nutrient cycling in forest ecosystems. *Bioscience Journal* **2007**, *23*, 29. [[Link](#)]
- ⁷² Vital, A. R. T.; Guerrini, I. A.; Franken, W. K.; Fonseca, R. C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. *Revista Árvore* **2004**, *28*, 793. [[CrossRef](#)]
- ⁷³ Pinto, S. I. C.; Martins, S. V.; Barros, N. F.; Dias, H. C. T. Ciclagem de nutrientes em dois trechos de floresta estacional semidecidual na reserva florestal Mata do Paraíso em Viçosa, MG, Brasil. *Revista Árvore* **2009**, *33*, 653. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁴ Gama-Rodrigues, A. C.; Barros, N. F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Árvore* **2002**, *26*, 193 [[Link](#)]
- ⁷⁵ O'Connell, A. M.; Sankaran, K. V.; *Organic matter accretion, decomposition and mineralisation in Management of soil, nutrientes and water in tropical plantations forests*. Nambiar, E. K. S., Brown, A. G., ACIAR Australia/CSIRO: Canberra, 1997, cap. 13. [[Link](#)]
- ⁷⁶ Pulrolnik, K.; Barros, N. F.; Silva, I. R.; Novais, R. F.; Brandani, C. R. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2009**, *33*, 1125. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁷ Rangel, O. J. P.; Silva, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2007**, *31*, 1609. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁸ Silva, P. H. M.; Poggiani, F.; Libardi, P. L.; Gonçalves, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management* **2013**, *301*, 67. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁹ Eaton, W. D. Microbial and nutrient activity in soils from three different subtropical forest habitats in Belize, Central America before and during the transition from dry to wet season. *Applied Soil Ecology* **2001**, *16*, 219. [[CrossRef](#)]
- ⁸⁰ He, Y.; Yang, S.; Xu, J.; Wang, Y.; Peng, S. Ammonia volatilization losses from paddy fields under controlled irrigation with different drainage treatments. *The Scientific World Journal* **2014**. [[CrossRef](#)]
- ⁸¹ Viero, F.; Bayer, C.; Fontura, S. M. V.; Moraes, R. P. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2014**, *38*, 1515. [[CrossRef](#)]
- ⁸² Coutinho, R. P.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M.; Alves, B. J. R.; Torres, A. Q. A.; Jantalia, C. P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2010**, *45*, 195. [[CrossRef](#)]
- ⁸³ Wrage, N.; Velthof, G. L.; van Beusichem, M. L.; Oenema, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry* **2001**, *33*, 1723. [[CrossRef](#)]
- ⁸⁴ Neill, C.; Steudler, P. A.; Garcia-Montiel, D. C.; Melillo, J. M.; Feigl, B. J.; Piccolo, M. C.; Cerri, C. C. Rates and controls of nitrous oxide and nitric oxide emissions following conversion of forest to pasture in Rondônia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2005**, *71*, 1. [[CrossRef](#)]
- ⁸⁵ Davidson, E. A.; Bustamante, M. M. C.; Pinto, A. S. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from soils of native and exotic ecosystems of the Amazon and Cerrado regions of Brazil. *The Scientific World* **2001**, *1*, 312. [[CrossRef](#)]
- ⁸⁶ Nogueira, A. K. S.; Rodrigues, R. A. R.; Silva, J. J. N.; Botin, A. A.; Silveira, J. G.; Mombach, M. A.; Armacolo, N. M.; Romeiro, S. O. Fluxos de óxido nitroso em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2016**, *51*, 1156. [[CrossRef](#)]

- ⁸⁷ Fialho, R. C.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Viçosa, 2016. [[Link](#)]
- ⁸⁸ Rochette, P.; Angers, D. A.; Chantigny, M. H.; MacDonald, J. D.; Gasser, M. O.; Bertrand, N. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2009**, *84*, 71. [[CrossRef](#)]
- ⁸⁹ Andrade, E. M.; Aquino, D. N.; Crisóstomo, L. A.; Rodrigues, J. O.; Lopes, F. B. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. *Ciência Rural* **2009**, *39*, 88. [[CrossRef](#)]
- ⁹⁰ Phillips, I.; Burton, E.; Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic Sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2005**, *73*, 1. [[CrossRef](#)]
- ⁹¹ Correa, R. S.; Whife, R. R.; Weatherley, A. J. Risk of Nitrate Leaching from Two Soils Amended with Biosolids. *Water Resources* **2006**, *33*, 453. [[CrossRef](#)]
- ⁹² Vital, M.H.F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. *Revista do BNDES* **2007**, *14*, 235. [[Link](#)]
- ⁹³ MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 2012. [[Link](#)]
- ⁹⁴ Ministério do Meio Ambiente. Acordo de Paris. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris> >. Acessado em: 22 agosto 2018.
- ⁹⁵ Brasil. Ministério do Meio Ambiente. ENREDD+: estratégia nacional para redução das emissões provenientes do desmatamento e da degradação florestal, conservação dos estoques de carbono florestal, manejo sustentável de florestas e aumento de estoques de carbono florestal / Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Departamento de Políticas de Combate ao Desmatamento. Brasília: MMA, 2016. [[Link](#)]