

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

**Dinâmica do nitrogênio em duas áreas de pastagem em
regeneração natural no Parque Estadual da Serra do Mar – núcleo
Santa Virgínia**

Juliana Gonzalez Gragnani

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração:
Ecologia aplicada

**Piracicaba
2014**

Juliana Gonzalez Gragnani
Bacharel em Gestão Ambiental

**Dinâmica do nitrogênio em duas áreas de pastagem em regeneração natural no
Parque Estadual da Serra do Mar – núcleo Santa Virgínia**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO MARTINELLI**

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestra em Ciências. Área de concentração:
Ecologia aplicada

Piracicaba
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Gragnani, Juliana Gonzalez

Dinâmica do nitrogênio em duas áreas de pastagem em regeneração natural no Parque Estadual da Serra do Mar – núcleo Santa Virgínia / Juliana Gonzalez Gragnani . - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.

82 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2014.

1. Mata Atlântica 2. Floresta Secundária 3. Isótopos 4. Ocupação do solo I. Título

CDD 631.41
G737d

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais, Sérgio e Kátia, pelo amor e por terem me ensinado que nas diversas empreitadas da vida, independente dos resultados alcançados, é através do caminho percorrido que nos elevamos.

Às minhas irmãs, Marcela e Ana Paula, pela amizade e pelo apoio.
Ao meu irmão Raphael, que nos proporcionou tanta alegria ao nascer e nos faz mais feliz a cada dia.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que ilumina meu caminho e guia meus passos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli (Zebu), pela dedicação, paciência e confiança. Obrigada pela amizade, pelos ensinamentos e por ter em mim despertado fascínio pelos isótopos estáveis!

À Prof.^a Dr.^a Gabriela Bielefeld Nardoto, que eu tanto estimo e admiro, pela amizade e pelas valiosas contribuições científicas.

Aos meus queridos avós paternos, Odete Buffara e Carlos Gragnani (A saudade é imensa!), e avós maternos, Antônio Manoel Gonçalez e Janete Pinheiro Gonçalez, pelas manifestações frequentes de carinho e incentivo.

À minha amiga-irmã Marina Rodrigues, que ao longo de mais de 10 anos de amizade vibra ao meu lado vitórias suas e minhas.

À Rafaela Lins, minha “alminha” e conselheira, que divide comigo a paixão pelos isótopos, pela companhia nos estudos e pela amizade sem limite.

À Nicole Lipparelli e à Julia Morena, minhas grandes amigas, por todo carinho e apoio.

Aos meus tios Débora, Graziella, Eduardo, Sandra, Ercília e Sérgio e aos meus primos Lucas, Leonardo, João Pedro, Fabrizio, Tatiana e Thaís. Também ao Carlos e à Neucy, que hoje fazem parte da minha família!

Aos meus amigos esalquianos, especialmente à Juliana Mariê Kobayashi (Kiaki), à Amanda Theophilo (Poltrona) e à Olívia Torrezan (Popai), que tornaram inesquecíveis os tempos de faculdade.

À Maisa Daruge, pelo amor incondicional, sempre.

A todos os amigos e pesquisadores que tornaram possível a realização deste trabalho: Luciana Della Coletta, Elizabethe de Campos Ravagnani, Juliana Antônio, Sílvia Mardegan e Edmar Mazzi. Obrigada por todo o auxílio nos trabalhos de campo, pelas dicas e pelos memoráveis momentos vividos no alojamento do Parque Estadual da Serra do Mar!

À Magda Gonçalves Lima, ao Gabriel Dalla Colletta e ao Prof. Vinícius Castro Souza, do Departamento de Ciências Biológicas (ESALQ/USP), responsáveis pela identificação das plantas coletadas.

Ao “mateiro” Wagner, que trabalha no Parque Estadual da Serra do Mar e esteve conosco durante todo (ou quase todo) tempo no campo.

À Fabiana Fracassi Adorno, à Maria Antônia Perez (Toninha), ao Prof. Plínio Camargo, à Natássia Bonini, à Melissa Martinez e a todos os outros funcionários, professores, alunos e estagiários do Laboratório de Ecologia Isotópica (CENA/USP).

À Mara Casarin, do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ecologia Aplicada, pela paciência e por estar sempre disposta a ajudar.

Ao Secretário de Defesa do Meio Ambiente, eng. Francisco Rogério Vidal e Silva, e a todos os colegas de trabalho da Prefeitura Municipal de Piracicaba, pelo apoio ao longo dessa jornada. Em especial aos amigos Giovanni Batista Campos, Thalita Tararam, Cláudia Nogueira, Tatiana Toffoletto, Dênis Schiavinato, Bruno Delarole, Felipe Vieira, William Nascimento, Melina Cillos e Daniele Campitelli.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro.

E, finalmente, à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura - Universidade São Paulo, pela concessão da infraestrutura necessária à realização desta pesquisa.

*"... mas se Deus é as flores e as árvores
e os montes e sol e o luar,
então acredito nele,
então acredito nele a toda a hora,
e a minha vida é toda uma oração e uma missa,
e uma comunhão com os olhos e pelos ouvidos."*

Alberto Caeiro (Fernando Pessoa)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	19
1.2 Hipóteses	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 A dinâmica de N em Florestas Tropicais	21
2.2 Alterações antrópicas do ciclo do N	23
2.3 Disponibilidade de nutrientes em áreas de pastagem em regeneração natural	24
2.4 <i>Tibouchina sellowiana</i> e <i>Psidium cattleianum</i> : as espécies predominantes nas transecções estudadas	26
2.5 Uso de isótopos estáveis em estudos ambientais	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Áreas de estudo	33
3.1.1 Caracterização	33
3.1.2 Histórico de perturbação	34
3.2 Coleta de dados	37
3.2.1 Coleta de solo e de material foliar	37
3.2.2 Período de amostragem	38
3.3 Análises isotópicas e físico-químicas	38
3.3.1 Análise física do solo	39
3.3.2 Determinação de carbono, nitrogênio e da composição isotópica do carbono e nitrogênio estáveis nas folhas e no solo	39
3.3.3 Determinação da concentração de fósforo nas folhas	40
3.4 Análises estatísticas	41
4 RESULTADOS	43
4.1 Distribuição das espécies vegetais no Puruba e no Pirapitinga	43
4.2 Caracterização físico-química do solo	46
4.3 Composição isotópica do nitrogênio e do carbono estáveis no solo	48
4.4 Determinação da concentração de carbono, nitrogênio e fósforo, bem como da composição isotópica do nitrogênio e do carbono nas folhas	50

4.5 Determinação da concentração de nitrogênio, da razão C:N e da composição isotópica do nitrogênio estável nas folhas de <i>Tibouchina sellowiana</i> e <i>Psidium cattleianum</i>	52
5 DISCUSSÃO	55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65
ANEXOS	73

RESUMO

Dinâmica do nitrogênio em duas áreas de pastagem em regeneração natural no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Santa Virgínia

No Núcleo Santa Virgínia do Parque Estadual da Serra do Mar, localizado no litoral norte paulista, há um mosaico com florestas conservadas entremeadas por antigas pastagens. Algumas áreas, apesar de apresentarem diferenças com relação ao tempo de abandono, possuem um padrão de ocupação do solo semelhante: nas partes mais baixas do terreno há remanescentes das antigas pastagens e nas partes mais elevadas existe uma vegetação mais diversificada e de maior porte, caracterizando-se como uma floresta secundária. Há entre essas partes um trecho de transição que apresenta um número reduzido de espécies vegetais. O objetivo deste estudo foi investigar a dinâmica do nitrogênio em duas áreas, o Puruba e o Pirapitinga, com 7 e 36 anos de abandono, respectivamente. Para tanto, foram analisadas as concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo, além da composição isotópica do carbono e nitrogênio estáveis em 277 amostras de solo e 412 amostras de folhas coletadas ao longo de transecções que se estenderam de antigas pastagens até as florestas secundárias. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo diminuíram ao longo das transecções, indicando que a matéria orgânica produzida pela vegetação secundária, predominantemente C_3 , vem substituindo a antiga vegetação C_4 , sendo isso mais evidente nas partes mais elevadas do terreno. Nas áreas de pastagem, a contribuição relativa de plantas C_4 foi estimada em 0,34 no Puruba e 0,31 no Pirapitinga. Com relação à composição química do solo, apenas foram significativos os aumentos dos teores de C e N, provavelmente relacionados ao incremento da quantidade de matéria orgânica. Com relação à dinâmica do nitrogênio, esperava-se que os resultados indicassem ao longo da transecção o enriquecimento do sistema, com aumento da concentração desse nutriente e da relação N:P nas folhas, culminando com o aumento dos valores de $\delta^{15}\text{N}$. Comparando-se o conjunto de espécies coletadas em cada porção das transecções, as tendências encontradas não foram tão evidentes. No Puruba, somente a relação N:P teve o comportamento esperado. No Pirapitinga, os teores de nitrogênio foram menores na área de pastagem, aumentando significativamente na área de transição e floresta, e a mesma tendência foi observada para as relações C:N e N:P. Considerando que a variabilidade entre espécies pode ser alta, mascarando possíveis tendências ao longo das transecções, foi analisada a composição foliar das espécies predominantes, as quais foram *Tibouchina sellowiana* no Puruba e *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum* no Pirapitinga. No Puruba, o teor médio de N e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram menores na transição do que na floresta. No Pirapitinga, o teor de N foi maior na transição que na pastagem, conforme o esperado, mas os valores de $\delta^{15}\text{N}$ não seguiram a tendência esperada. Talvez, a falta de padrões claros ao longo das transecções, como encontrado em outros estudos desenvolvidos no país, resida no fato de este estudo ter contemplado áreas de pastagens que ainda não se tornaram formações florestais propriamente ditas, onde a colonização por plantas C_3 ainda está em seu início, apesar da elevada proporção de C de origem C_3 ter sido incorporada ao solo.

Palavras-chave: Mata Atlântica; Floresta Secundária; Isótopos; Ocupação do solo

ABSTRACT

Nitrogen dynamics in two pastures on natural regeneration in the Serra do Mar State Park - Santa Virgínia

In the North coast of the State of São Paulo at 1,000 of altitude there is a mosaic of conserved forests interspersed with old pastures. Despite the differences between the areas with respect to the abandonment time, the pattern of land use is similar, with the lower parts of the terrain occupied by remnants of the old pastures, while the higher parts have a higher area and more diverse vegetation, characterized as a secondary forest. Between them there is a stretch of transition, which includes a small number of plant species. The aim of this study was to investigate the nitrogen dynamic in two areas, Puruba and Pirapitinga, with 7 to 36 years of regeneration, respectively. To this end, the concentrations of foliar and soil carbon, nitrogen and phosphorus were analyzed, in addition to isotopic composition of carbon and stable nitrogen in 277 soil samples and 412 leaf samples collected along transects that extended from old pastures to secondary forests. $\delta^{13}\text{C}$ values of the soil decreased along the transects, indicating that the organic matter produced by secondary vegetation that is exclusively C_3 , is replacing the earlier vegetation C_4 . In pasture areas, the relative contribution of C_4 plants was estimated at 0.34 in Puruba and 0.31 in Pirapitinga. With respect to the chemical composition of the soil, only the increases in concentrations of C and N were significant, probably due to the increasing inputs of organic matter via litterfall. With regard to the dynamic of nitrogen, it was expected that the results would indicate an N-enrichment of the system along the transect, with increasing concentration of the nutrient and the N:P leaves, leading to higher values of $\delta^{15}\text{N}$. Comparing the number of species collected in each portion of the transects, the trends observed were not as evident. In Puruba, only N:P had the expected behavior. In Pirapitinga, nitrogen contents were lower in the grazing area, increasing significantly in the transition area and forest, and the same trend was observed for the C:N and N:P. Considering that the variability between species can be high, masking possible trends along the transects, leaf composition of the predominant species, which were *Tibouchina sellowiana* in Puruba and *Tibouchina sellowiana* and *Psidium cattleianum* in Pirapitinga was analyzed. In Puruba, only the average N content was lower than in the transition forest. In Pirapitinga, N content was higher in transition than in the pasture and the C:N lower, as expected, but the $\delta^{15}\text{N}$ values did not follow the expected trend. Perhaps, the lack of clear patterns along the transect, as found in other studies, lies in the fact that this study covered grazing areas that have not yet become developed forests, where colonization by C_3 plants is still in its beginning, despite the high proportion of it incorporated into the soil.

Keywords: Atlantic Forest; Secondary Forest; Isotopic; Land Use

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas tropicais são constantemente ameaçados por mudanças no uso do solo e outras perturbações antrópicas, por isso, os esforços nas últimas duas décadas visando o entendimento da dinâmica ecológica em múltiplas escalas, incluindo a forma pela qual é realizada a ciclagem biogeoquímica de nutrientes, vêm aumentando (TOWNSEND et al., 2011).

A Mata Atlântica é uma das maiores Florestas Tropicais das Américas (CÂMARA, 2003) e estende-se, no Brasil, do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul (Figura 1). Segundo Ribeiro et al. (2009), ocupa cerca de 16 milhões de hectares de remanescentes, ou seja, aproximadamente 12% de sua extensão original. No que diz respeito à diversidade biológica, possui 20.000 espécies de plantas vasculares, das quais 8.000 são restritas ao bioma. A perda acelerada de habitat associada ao grande número de espécies endêmicas fazem dela um dos cinco principais *hotspots* de biodiversidade do mundo (MYERS et al., 2000).

A exploração desse bioma é antiga e intensa (DEAN, 1996). A conversão de florestas em culturas agrícolas, pastagens e centros urbanos, com elevados níveis de degradação e fragmentação, alterou profundamente a paisagem, comprometendo a resiliência natural dos ecossistemas florestais ainda existentes (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009). A primeira atividade econômica desenvolvida na costa Atlântica da América do Sul foi a extração do pau-brasil (*Caesalpinia echinata*), seguida de um período de exploração de diversos produtos agrícolas, tais quais a banana, a cana-de-açúcar, o café e o algodão.

Ainda que vários ciclos econômicos tenham ocorrido simultaneamente em diferentes partes do país, geralmente, quando a atividade pecuária se inicia, a floresta original foi substituída já há muito tempo por outras culturas, e estas, substituídas mais recentemente por pastagens (DEAN, 1996). As pressões elevadas exercidas pelo pisoteio dos animais nas pastagens acarretam inúmeros prejuízos ao solo, entre eles, compactação, diminuição da porosidade total, alteração das propriedades hidráulicas (CENTURION; CARDOSO; NATALE, 2001), aumento da densidade e resistência à penetração das raízes (IMHOFF; SILVA; TORMENTA, 2000). Além da degradação das propriedades físicas do solo, a redução da estrutura vegetal pode acarretar, em alguns casos, perdas de nitrogênio (N) e consequente alteração do ciclo desse nutriente.

Geralmente, durante o processo sucessional, a disponibilidade inicial de N é baixa, com aumento gradual durante a sucessão (DAVIDSON et al., 2007), todavia, Vitousek, Matson e Cleve (1989), avaliando trabalhos sobre a concentração de N e as taxas de mineralização e nitrificação durante os processos de sucessão primária e secundária em florestas temperadas, concluíram que a dinâmica do N nem sempre seguirá padrões claros. Quando se trata de áreas agrícolas, nas quais foi realizada atividade agropecuária por muito tempo antes do abandono, a variação pode ser ainda maior do que nos locais que sofreram algum tipo de exploração, como o corte raso da floresta, e foram abandonados imediatamente. Tal variação está, em grande parte, relacionada às diferenças de cada ambiente no que diz respeito ao histórico de perturbação (VITOUSEK; MATSON; CLEVE, 1989).

No Brasil, a Mata Atlântica remanescente está distribuída em cerca de 250.000 fragmentos florestais (RIBEIRO et al., 2009), os quais apresentam diversos tamanhos, formas, estágios de sucessão e situação de conservação. A área de Mata Atlântica mais bem preservada entre os remanescentes brasileiros é a que está inserida na sub-região biogeográfica Serra do Mar e possui quase 40% da cobertura original do bioma, incluindo floresta, restinga e manguezal (RIBEIRO et al., 2009). Embora o desmatamento mundial permaneça com taxas elevadas, alcançando cerca de 13 milhões de hectares por ano, a cobertura florestal em 18 países começou a crescer, o que significa aumento dos processos de regeneração natural e recuperação assistida (CHAZDON, 2008). Recuperação assistida refere-se a um conjunto de ações dirigidas – podendo incluir o isolamento de fatores de degradação, o plantio de árvores etc. – que visam à recuperação das funções ecossistêmicas.

A criação, a partir do Decreto 10.251/1977 (alterado pelo Decreto 13.313/79), do Parque Estadual da Serra do Mar, localizado no litoral norte paulista, e a incorporação recente de novas áreas a esse Parque, colaboraram para a formação de um mosaico com florestas conservadas entremeadas por antigas pastagens. No Núcleo Santa Virgínia do Parque existem áreas outrora utilizadas como pastagem com tempos de abandono distintos cujo padrão de ocupação do solo é, visualmente, semelhante. Nas partes mais baixas do terreno ainda predominam essas antigas pastagens, enquanto nas mais altas há uma vegetação mais diversificada e de maior porte, com o sub-bosque mais desenvolvido, caracterizando-se como uma floresta

secundária. Há também um trecho de transição entre elas, que apresenta um número reduzido de espécies vegetais.

Estudos desenvolvidos em florestas tropicais em regeneração demonstraram que, à medida que se dá o processo sucessional, as taxas de mineralização, nitrificação e emissão de óxido nitroso do solo aumentam e, concomitantemente, as folhas da vegetação tornam-se mais enriquecidas em N, apresentando maior razão N:P (DAVIDSON et al., 2007; AMAZONAS, 2010; AMAZONAS et al., 2011). Como têm sido demonstrado na literatura sobre o tema, ecossistemas tropicais com maior disponibilidade de N tendem a apresentar valores mais elevados da abundância natural de isótopos estáveis de N ($\delta^{15}\text{N}$). Essas constatações levaram vários autores a concluir que, no início da regeneração, os ecossistemas são mais limitados por N e, com o gradual aumento na abundância desse nutriente, passam a ser mais limitados por fósforo (P). (AERTS, R.; CHAPIN III, 2000; MARTINELLI et al., 1999; DAVIDSON et al., 2007; CHADWICK et al., 1999; AMAZONAS et al., 2011; VITOUSEK; MATSON; CLEVE, 1989).

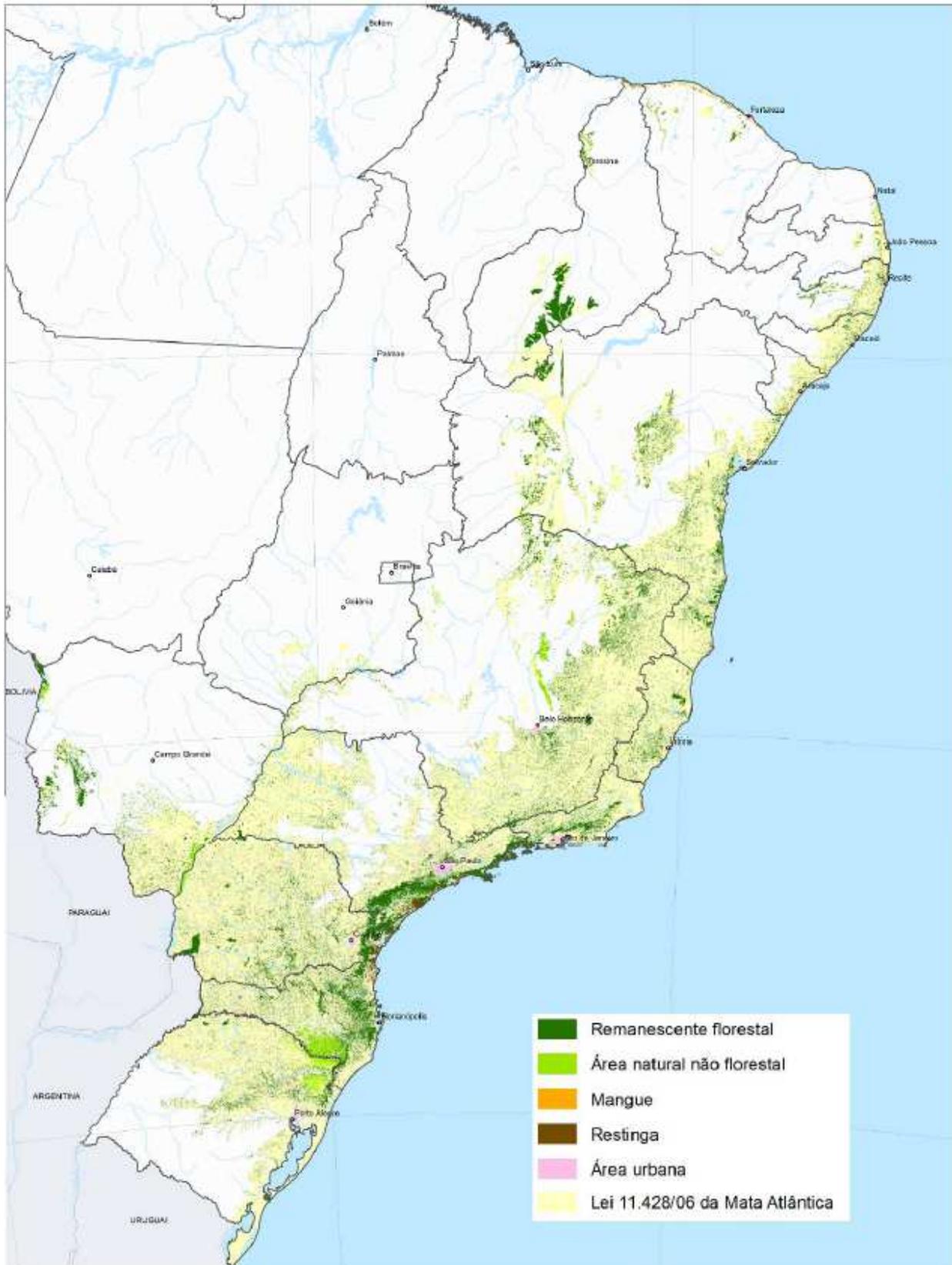


Figura 1 - Mapa do Brasil com destaque para o Bioma Mata Atlântica contendo remanescentes florestais, ano base 2012

(Fonte: FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2013).

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo foi investigar a dinâmica do N, assim como as alterações na disponibilidade de carbono e fósforo, em duas áreas em regeneração natural anteriormente ocupadas por pastagem em Floresta Ombrófila Densa Montana localizada no Parque Estadual da Serra do Mar, litoral norte do Estado de São Paulo. Para tanto, foram analisadas amostras de solo e de folhas coletadas ao longo de transecções que se estenderam de antigas pastagens até as partes ocupadas por um número maior de espécies arbustivas e arbóreas, as quais, por facilidade, foram denominadas florestas secundárias.

1.2 Hipóteses

As hipóteses principais levantadas neste estudo foram as seguintes:

- A composição isotópica do carbono na matéria orgânica do solo ($\delta^{13}\text{C}$) indicará, ao longo das transecções, a substituição das antigas pastagens, que ainda predominam nas partes mais baixas do terreno, pelas florestas secundárias que vêm se recompondo nas partes mais elevadas.
- Nas pastagens, as concentrações de N e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ na vegetação serão menores, assim como observado em durante os primeiros estágios de sucessão na região Amazônica por Davidson et al. (2007). Em contrapartida, nos trechos de florestas secundárias, tais parâmetros serão semelhantes aos resultados obtidos em florestas primárias (DAVIDSON et al., 2007).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A dinâmica de N em Florestas Tropicais

O N é essencial à sobrevivência de todas as formas de vida. O ciclo biológico desse elemento, que inclui os ciclos bioquímico e biogeoquímico, é um dos mais importantes e complexos ciclos globais, e descreve um processo dinâmico de intercâmbio do nutriente entre a atmosfera, a matéria orgânica e os compostos inorgânicos (MARTINS et al., 2003). O ciclo bioquímico refere-se à translocação de nutrientes entre tecidos novos e senescentes das plantas e o ciclo biogeoquímico, por sua vez, abrange a movimentação do nutriente entre o solo e a biomassa vegetal desde a absorção pela planta e a alocação em seus diferentes componentes até a transferência para o solo através da deposição de serapilheira.

Apesar de ser o elemento químico mais abundante na atmosfera terrestre, contribuindo com aproximadamente 78% de sua composição, o N atmosférico (N_2) não pode ser utilizado diretamente pela maioria dos seres vivos. Enquanto os animais necessitam de N incorporado aos compostos orgânicos como proteínas e ácidos nucleicos, as plantas e algas necessitam de N sob a forma inorgânica – íons amônio (NH_4^+) e íons nitrato (NO_3^-) (MARTINS et al., 2003). Nos ecossistemas naturais, uma parte do N absorvido pelos vegetais encontra-se sob a forma de N orgânico dissolvido (NOD), que é proveniente da decomposição da matéria orgânica morta presente no solo (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002). Quando o solo é limitado por carbono (C), os microorganismos quebram o NOD, usam moléculas de C e liberam no solo amônio (NH_4^+), preferencialmente, em um processo denominado mineralização ou amonificação (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002). Em alguns ecossistemas, todo o NH_4^+ é convertido em nitrito (NO_2) e, posteriormente, em nitrato (NO_3^-), através de um processo denominado nitrificação. A mineralização líquida resulta, portanto, no acúmulo de N inorgânico na solução do solo ao longo de um determinado tempo, que ocorre quando o crescimento vegetacional é mais limitado por C do que por N (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002). Percebe-se, portanto, que o ciclo do N está fortemente associado ao ciclo do C. A razão entre a quantidade desses dois elementos presente na matéria orgânica do solo indica o nível de competição entre as plantas pelo N disponível (LEPSCH, 2011).

Outra transformação do N mediada por microorganismos é a fixação biológica. As árvores pertencentes à família Fabaceae (Leguminosae), especialmente as subfamílias Papilonoideae e Mimosoideae, estabelecem associações simbióticas com bactérias do gênero *Rhizobium*, as quais convertem o N atmosférico em formas assimiláveis pela vegetação. Nos ambientes degradados, essas associações exercem influência fundamental na recuperação do solo (FRANCO et al., 1992) e no desenvolvimento comunidade vegetal (SIDDIQUE et al., 2008), já que parte dos nutrientes, em especial o N e o P, absorvidos pelas espécies potencialmente fixadoras poderá ser disponibilizada para as outras espécies que ocupam o local por meio da decomposição da serapilheira (JORDAN; HERRERA, 1981; FRANCO et al., 1992).

Além da decomposição, mineralização, nitrificação e fixação biológica, ocorre o processo de desnitrificação através do qual o N, geralmente nas formas NO_2^- ou NO_3^- , retorna para a atmosfera sob a forma de N atmosférico, óxido nitroso (N_2O) ou óxido nítrico (NO). Essas emissões de gases, assim como a lixiviação e as taxas de mineralização, são maiores nas Florestas Tropicais, que geralmente são mais ricas em N do que as Florestas Temperadas (DAVIDSON; ISHIDA; NEPSTAD, 2004).

Dentre as formações florestais tropicais que ocorrem no Brasil, destaca-se a Floresta Ombrófila Densa que, segundo Veloso et al. (1991), inclui, além das áreas alagáveis denominadas restingas, as florestas de Terras Baixas, Submontana e Montana. Estas, situadas a 1000 metros de altitude, possuem temperatura e umidade reduzidas, além de ciclagem de N e P diminuída (VITOUSEK; MATSON, 1984) apresentando-se mais pobres nutricionalmente. Entre as possíveis causas para esse empobrecimento destacam-se a imobilização no solo, decorrente da decomposição incompleta da serapilheira, e a maior frequência de distúrbios como, por exemplo, a perda de grande quantidade de solo através de processos erosivos devido à declividade acentuada (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998). As Florestas Tropicais Montana assemelham-se, comumente, mais às Florestas Temperadas do que à maioria das Florestas Tropicais de Terras Baixas (100 metros) (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998). Conforme Ewel (1980), tais diferenças estão refletidas no crescimento da vegetação que, em termos de biomassa, ocorre mais rapidamente nas Terras Baixas do que na Montana.

2.2 Alterações antrópicas do ciclo de N

O suprimento de N é de extrema importância para o funcionamento dos ecossistemas e isso pode ser comprovado quando o N é adicionado, pois se observa mudança na produtividade, dinâmica e diversidade dos ecossistemas. A disponibilidade desse nutriente está intimamente relacionada à produção primária (EPSTEIN; BLOOM, 2005), ao crescimento vegetal, à quantidade de serapilheira produzida (VITOUSEK, 1982) e à composição de espécies, conforme a estratégia de sobrevivência de cada uma delas (SORREANO, 2006). Quando crescem em solos ricos em N as plantas apresentam concentrações mais elevadas desse elemento em seus tecidos, além de maior capacidade fotossintética, se comparadas às mesmas espécies crescendo em solos menos férteis (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002).

Com exceção à falta de água, nenhuma deficiência é tão dramática em seus efeitos quanto a de N, e as partes mais maduras dos vegetais são as primeiras a serem afetadas, já que o elemento é translocado das partes mais velhas para as mais jovens (EPSTEIN; BLOOM, 2005). Em sistemas relativamente pobres em N, a maior parte do nutriente necessária ao crescimento vegetal é fornecida pela decomposição da matéria orgânica, enquanto a outra parte entra no ecossistema através da fixação biológica e da deposição atmosférica nas formas de amônia, nitrato e óxido nitroso (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002). Há, no entanto, um grande número de processos e mecanismos que provocam a redução da disponibilidade biológica de N, entre eles, a imobilização no solo decorrente da decomposição incompleta da serapilheira, as perdas de solo através da erosão (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998), a lixiviação, a volatilização e a desnitrificação (CANTARELLA, 2007).

As ações antrópicas visando aliviar as deficiências nutricionais das plantas para o desenvolvimento agrícola e industrial, apesar de terem proporcionado benefícios inquestionáveis às sociedades modernas, alteraram consideravelmente os ciclos biogeoquímicos e, também, a disponibilidade de nutrientes em toda a biosfera (TOWNSEND; ASNER, 2013). Apesar de existir mais N estocado na atmosfera do que no ambiente terrestre, mudanças recentes ocasionadas pela ação do Homem na Terra vêm determinando o aumento do aporte atmosférico desse nutriente, com várias consequências para os ecossistemas (MARTINELLI et al.,

2009). O excesso de N poderá acumular-se ao longo do tempo de maneira ainda desconhecida na água subterrânea, na vegetação ou no solo (MARTINELLI et al., 2009) e em ecossistemas alterados o ciclo do elemento conseqüentemente sofre modificações (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2002).

Entre as atividades antrópicas que afetam a disponibilidade e a mobilidade do nutriente destacam-se a mudança de uso do solo, a queima de combustíveis fósseis, o cultivo de plantas fixadoras, a criação de animais e a produção industrial de fertilizantes nitrogenados (VITOUSEK et al., 1997; MARTINELLI et al., 2009). Os impactos decorrentes de tais atividades podem ser locais ou globais. Martinelli et al. (2009) afirmam que algumas florestas em Bavária, sudeste da Alemanha, estão morrendo por excesso de N, e o mesmo problema pode estar ocorrendo em Cubatão (SP). Vitousek et al. (1997), ao estudarem as causas e conseqüências da alteração antrópica no ciclo global de N, concluíram que a transferência de N da atmosfera para as formas biologicamente disponíveis pode estar sendo duplicada, contribuindo, portanto, para o aumento das emissões do gás estufa N_2O , a perda de nutrientes como o Ca e o potássio (K), além da alteração do ciclo do C.

2.3 Disponibilidade de nutrientes em áreas de pastagem em regeneração natural

A disponibilidade de nutrientes nos ecossistemas e a dinâmica de desenvolvimento da vegetação podem ser modificadas após quaisquer distúrbios, sejam naturais ou antrópicos (DAVIDSON et al., 2007; BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009). Existem diferentes trajetórias de distúrbio, entre elas, eventos naturais como vendavais, alagamentos, queimadas e longos períodos de estiagem; variações naturais nas condições microclimáticas e edáficas; alterações profundas das características ambientais bióticas e abióticas produzidas como conseqüência do processo de transformação antrópica da paisagem (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009), incluindo a conversão de florestas em culturas agrícolas e pastagens.

Em uma floresta, a retirada da cobertura vegetal altera as propriedades químico-físicas e biológicas do solo (CENTURION; CARDOSO; NATALE, 2001), podendo torná-lo mais suscetível à perda de nutrientes por erosão, lixiviação e volatilização (VITOUSEK; MATSON, 1984). Centurion, Cardoso & Natale (2001)

compararam as alterações nas propriedades do solo entre pastagens, terras sob cultivo (milho e cana-de-açúcar) e matas, consideradas em “estado natural”. Todos os sistemas de manejo apresentaram formação de camada compactada e, conseqüentemente, aumento do escoamento superficial e da erosão, sendo que as maiores mudanças ocorreram nas pastagens.

A recuperação de uma área degradada depende do histórico de perturbação e da evolução da comunidade durante o processo sucessional, a qual ocorre lentamente e é caracterizada por um aumento do número de espécies e da complexidade do ecossistema ao longo do tempo (RODRIGUES, 1995). Durante o surgimento e o desenvolvimento de um ecossistema florestal, a composição e a estrutura de vegetação dependerão da capacidade de sobrevivência das espécies ou, até mesmo, do seu potencial de retornar ao local atingido após o distúrbio (PICKETT; CADENASSO, 2005).

Anteriormente, a sucessão florestal era considerada um processo em que a vegetação modificava-se em um sentido unidirecional e previsível, culminando em um ecossistema estabilizado (ODUM, 1969), que era único e bem definido. Sob esse ponto de vista, as áreas desprovidas de vegetação seriam inicialmente ocupadas por espécies pioneiras, as quais dariam lugar progressivamente às espécies pertencentes aos grupos mais avançados da sucessão, até que a vegetação alcançasse um estado de equilíbrio. Essa ideia passou a ser questionada a partir da compreensão de que as comunidades naturais são sistemas abertos que sofrem interferências de fatores internos e externos muitas vezes imprevisíveis (PICKETT et al., 1992). Atualmente sabe-se que há vários estados clímax e, então, o processo sucessional passou a ser considerado um produto de eventos estocásticos, uma vez que não segue necessariamente uma ordem prescrita e apresenta múltiplas trajetórias possíveis para atingir um equilíbrio dinâmico, que são os “estágios alternativos estáveis” (PICKETT et al., 1992; PICKETT; CADENASSO, 2005). Os trabalhos voltados à restauração florestal que estão sendo desenvolvidos atualmente abandonaram o modelo de floresta madura, criado a partir dos melhores fragmentos remanescentes de uma dada região, e admitiram a possibilidade de estabelecimento de diferentes comunidades finais em termos florísticos e estruturais em um mesmo ambiente, dependendo da atuação de fatores estocásticos definidores de tais características (ISERNHAGEN et al., 2009).

2.4 *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum*: as espécies predominantes nas transecções estudadas

De acordo com o Sistema de Classificação Vegetal baseado no The Angiosperm Phylogeny Group (APG) III (2009), a *Tibouchina sellowiana* (Figura 2), conhecida vulgarmente como quaresmeira, quaresmeirinha, tibouchina-da-serra, manacá, manacá-da-serra ou quaresmeira da serra, é uma espécie pertencente à família Melastomataceae que atinge altura e DAP (diâmetro medido a 1,30 metros do solo) de, aproximadamente, 10 metros e 40 centímetros, respectivamente. A espécie apresenta floração vistosa e abundante. Inicialmente as pétalas são brancas, evidenciando que estão aptas à polinização, mudando para róseo-forte a purpúreas. Ocorre naturalmente em vários tipos de solos e desenvolve-se melhor naqueles que apresentam drenagem boa e textura que varia de arenosa a areno-argilosa (CARVALHO, 2010). Ocorre na Mata Atlântica, nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Figura 4)

Em relação ao grupo sucessional e à importância ecológica, apresenta comportamento típico de espécie pioneira (FREITAS; TAKAKI; FIGUEIRA, 1998) e varia de heliófila a esciófila, apesar de tolerar baixas temperaturas (CARVALHO, 2010). É característica das formações secundárias das florestas baixas das encostas da Serra do Mar, onde pode formar agrupamentos quase puros (KLEIN, 1982). Tabarelli & Mantovani (1999b) consideraram-na importante na restauração e na recuperação de ecossistemas degradados, principalmente por tratar-se de espécie nativa e pioneira, e pelo seu potencial em termos de adensamento.

A espécie denominada *Psidium cattleianum* (Figura 3), por sua vez, conhecida como china-guava, araçá, araçá-amarelo, araçazeiro, araçá-do-campo, araçá-vermelho, araçá-doce, araçá-manteiga, araçá-da-praia, araçá-pera, araçá-de-coroa, araçá-rosa ou araçá-de-comer, pertence à família Myrtaceae e atinge altura entre 3 e 6 metros. Dotada de copa alongada e tronco tortuoso, apresenta variedades com frutos amarelos e vermelhos de polpa succulenta e adocicada, sendo, portanto, avidamente procurados por várias espécies de pássaros. Essa espécie é perenifólia, semidecídua e heliófita. Além disso, pode ser considerada indispensável nos plantios em áreas degradadas (LORENZI, 2009), assim como a *Tibouchina sellowiana*. Ocorre na Mata Atlântica, e também na Caatinga e no

Cerrado, nos estados Bahia, Ceará, Pernambuco, Sergipe, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Figura 5).



Figura 2 – Exsicata de *Tibouchina sellowiana* (<http://reflora.jbrj.gov.br/jabot/herbarioVirtual>)



Figura 4 – Locais identificados de ocorrência natural da *Tibouchina sellowiana* no Brasil (GUIMARÃES in Lista de Espécies da Flora do Brasil)



Figura 5 – Locais identificados de ocorrência natural da *Psidium cattleianum* no Brasil (Sobral et al. in Lista de Espécies da Flora do Brasil)

2.5 Uso de isótopos estáveis em estudos ambientais

Isótopos são espécies atômicas de um mesmo elemento químico que, apesar de apresentarem quantidades idênticas de prótons em seu núcleo, possuem uma pequena diferença de massa devido à variação no número de nêutrons (MARTINELLI et al. 2009; LUTTGE, 2007). Há na natureza isótopos radiativos e estáveis, sendo que os primeiros modificam suas massas ao longo do tempo por emissão de energia ou partículas subatômicas, enquanto os últimos mantêm sua massa atômica sempre constante (MARTINELLI et al., 2009).

Existem dois isótopos estáveis de N na natureza e a abundância natural desses isótopos no ar é, em média, 99,63% e 0,37% para ^{14}N e ^{15}N , respectivamente. A composição isotópica de um elemento, expressa como $\delta^{15}\text{N}$, é estabelecida pela relação entre o isótopo raro (mais pesado) e o isótopo abundante (mais leve). Como isótopo mais pesado é também mais lento, em uma reação química, a composição isotópica de um substrato será, comumente, diferente da composição isotópica do produto, criando o que é denominado “fator de fracionamento” ou “enriquecimento isotópico” (MARTINELLI et al., 2009). Conforme ocorre movimentação de um elemento químico em um ecossistema, sua composição isotópica sofre variações, possibilitando o uso de isótopos estáveis como traçadores ambientais, o que vem ocorrendo desde a década de 1930 (MARTINELLI et al., 2009).

A abundância natural de isótopos estáveis de N, quando analisada em compartimentos-chave dos ecossistemas, tais como folhas e solo, pode fornecer medidas integradoras sobre a dinâmica do nutriente ao longo do tempo, reduzindo a utilização de medidas pontuais e repetitivas (NARDOTO, 2005; MARDEGAN, 2007; LUTTGE, 2007; MARTINELLI et al., 2009; LINS, 2013). Martinelli et al. (2009) compararam a composição dos isótopos estáveis de N em Florestas Tropicais e Temperadas e constataram, considerando que a maioria das reações químicas deixa o substrato enriquecido em ^{15}N , que as Florestas Tropicais são mais ricas em N, apresentando uma ciclagem de N mais aberta.

As fontes mais comuns de N inorgânico para as plantas são o ar atmosférico, através da fixação biológica, e a matéria orgânica do solo, através da mineralização. Considerando que a assinatura isotópica da planta é semelhante à da fonte, é possível utilizá-la para, entre outras coisas, determinar a procedência do N

incorporado aos tecidos vegetais (DAWSON et al., 2002; NARDOTO, 2005; LUTTGE, 2007). Essa técnica tem como premissa que as plantas fixadoras refletirão uma mistura composta pelo N adquirido do ar, que tem valores de $\delta^{15}\text{N}$ próximos a 0‰, e pelo N adquirido do solo, que usualmente apresenta valores mais elevados (SHEARER; KOHL, 1986). Por outro lado, espécies que não são capazes de fixar N atmosférico terão refletidas em seus tecidos a composição isotópica das formas inorgânicas de N derivadas da matéria orgânica do solo. Assume-se ainda que o fracionamento entre a atmosfera e a planta seja baixo o suficiente para não mascarar possíveis diferenças entre plantas fixadoras e não fixadoras. Conforme Högberg (1997) esse fracionamento pode variar entre 0 e 2‰.

O C também possui dois isótopos estáveis, o ^{12}C e o ^{13}C . O isótopo ^{13}C perfaz aproximadamente 1% do C na natureza, sendo sua distribuição influenciada por processos naturais. Durante os processos fotossintéticos, algumas plantas discriminam o ^{13}C em favor do isótopo ^{12}C e, por isso, são divididas em C_3 (ciclo de Calvin), C_4 (Hatch-Slack) ou CAM (metabolismo ácido crassuláceo) (MARTINELLI et al., 2009). As plantas do tipo C_3 discriminam o C raro e apresentam uma razão isotópica entre -38 e -24‰, as plantas do tipo C_4 exibem uma relação isotópica que varia entre -15 e -11‰ e as plantas CAM mostram abundâncias isotópicas variáveis (MARTINELLI et al., 2009). A maioria das plantas superiores utiliza exclusivamente a via C_3 , sendo que as plantas C_4 são essencialmente gramíneas tropicais (CERRI, 1986).

Além disso, considerando que a cada transformação física ou biológica pela qual passa o C no ambiente ocorre algum fracionamento isotópico, inúmeros estudos utilizam os isótopos estáveis de C para verificar mudanças na paisagem (CERRI, 1986; COUTINHO et al., 2010; MARTINELLI et al., 2009, BOUTTON, 1991, EMBRAPA, 2007).

Como os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo normalmente são similares aos da vegetação nele presente, desde que tenha havido tempo suficiente para incorporação dos resíduos vegetais na matéria orgânica do solo (MARTINELLI et al., 2009; CAMARGO et al., 1999), quando a floresta é desmatada e a terra é utilizada como pastagem, a relação isotópica existente anteriormente ao distúrbio é modificada, pois há uma menor discriminação isotópica dos átomos de ^{13}C pelas plantas do tipo C_4 em relação às plantas do tipo C_3 (MARTINELLI et al., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Áreas de estudo

3.1.1 Caracterização

O Parque Estadual da Serra do Mar, que possui aproximadamente 315.000 hectares, representa a maior área contínua de Mata Atlântica no Brasil, e está inserido em 23 municípios do Estado de São Paulo. Devido à sua grande extensão, é gerenciado por meio de oito núcleos administrativos.

As duas áreas selecionadas para este estudo (Figura 6) localizam-se no Núcleo Santa Virgínia (45° 03' a 45° 11' W e 23° 17' a 23° 24' S), que abrange quatro municípios do Vale do Paraíba do Sul: São Luís do Paraitinga (maior parte), Cunha, Ubatuba e Natividade da Serra (Plano de Manejo PESH, 2006).

O solo é bem drenado e jovem, com perfis pouco desenvolvidos. É muito acidificado ($\text{pH} < 4$), possui alta concentração de alumínio, baixa concentração de cátions básicos e fósforo e constitui-se por 50-60% de areia (MARTINS, 2010). A vegetação predominante é a Floresta Ombrófila Densa Montana (VELOSO; RANGEL-FILHO; LIMA, 1991), formação florestal que recobre a Serra do Mar em altitudes que variam entre 500 e 1.100 metros.

Os índices pluviométricos são influenciados pela complexa topografia e pela proximidade com o mar, sendo 25°C a temperatura média nos meses mais quentes e 19°C nos meses mais frios. A precipitação média anual da região é aproximadamente 2.500 mm (SENTELHAS et al., 1999).



Figura 6 – Mapa de localização do Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual do Serra do Mar, São Paulo, Brasil

3.1.2 Histórico de perturbação

Na década de 1960, parte da floresta atlântica no Núcleo Santa Virgínia sofreu corte raso e queima, sendo substituída por pastagem (*Melinis minutiflora* - Gramineae). Atualmente, a paisagem apresenta-se na forma de mosaicos compostos por florestas maduras, pastagens, plantios de *Eucalyptus* spp. e florestas secundárias com diferentes idades de regeneração (TABARELLI; MANTOVANI, 1999a).

As informações sobre o histórico de perturbação das duas áreas contempladas nesse estudo foram obtidas junto ao engenheiro florestal João Paulo Villani, gestor do Núcleo até meados de 2013. Conforme Villani, ambas já foram utilizadas como pastagem e atualmente encontram-se em regeneração natural. A mais antiga foi incorporada ao Parque em 1977 e localiza-se próximo à hospedaria e à Trilha Pirapitinga ($45^{\circ} 07' 48''$ W e $23^{\circ} 17' 46''$ S). A outra, denominada Puruba, foi incorporada à Unidade de Conservação através do Decreto 56572/10, no entanto, está livre de intervenção antrópica desde 2006, quando o local foi desapropriado para fins de conservação ambiental.

Conforme já exposto anteriormente, apesar de possuírem idades diferentes, visualmente, parece existir semelhança entre o Puruba e o Pirapitinga no que diz respeito ao padrão de ocupação. As partes mais baixas do terreno são ocupadas por remanescentes das antigas pastagens (Figura 7), enquanto as partes mais altas possuem uma vegetação mais diversificada e de maior porte, com o sub-bosque mais desenvolvido, caracterizando-se como uma floresta secundária (Figura 9). Há, entre as partes mais baixas e mais altas, um trecho de transição (Figura 8).



Figura 7 – Puruba: Remanescente da antiga pastagem



Figura 8 – Puruba: Trecho de transição entre o remanescente da antiga pastagem e a floresta secundária



Figura 9 - Puruba: Vegetação mais diversificada e de maior porte, com o sub-bosque mais desenvolvido, caracterizando-se como uma floresta secundária

3.2 Coleta de dados

No Puruba e no Pirapitinga foram instaladas quatro transecções, sendo duas transecções adjacentes no Puruba e duas transecções adjacentes no Pirapitinga, desde os remanescentes de antigas pastagens até florestas secundárias, passando pela parte de transição. Cada uma das transecções apresentaram 2.000 m² no Puruba e 1.500 m² no Pirapitinga, e foram subdivididas em 20 e 15 parcelas (10 m x 10 m), respectivamente. A diferença entre o número de parcelas estabelecidas em cada uma delas ocorreu devido à necessidade de adaptação do delineamento amostral às características do local.

3.2.1 Coleta de solo e de material foliar

Foram coletadas quatro amostras de solo superficial na profundidade de 0-10 centímetros por parcela (Figura 10), totalizando 119 amostras no Pirapitinga e 158 amostras no Puruba. Também foram coletados, com auxílio de um podão, ramos de seis árvores por parcela (Figura 10), perfazendo 172 amostras no Pirapitinga e 240 amostras no Puruba (ver item 4.1).

A identificação botânica das amostras foi realizada no Departamento de Ciências Biológicas (ESALQ/USP) pelos biólogos Magda Gonçalves Lima e Gabriel Dalla Colletta, orientados pelo Prof. Vinícius Castro Souza.

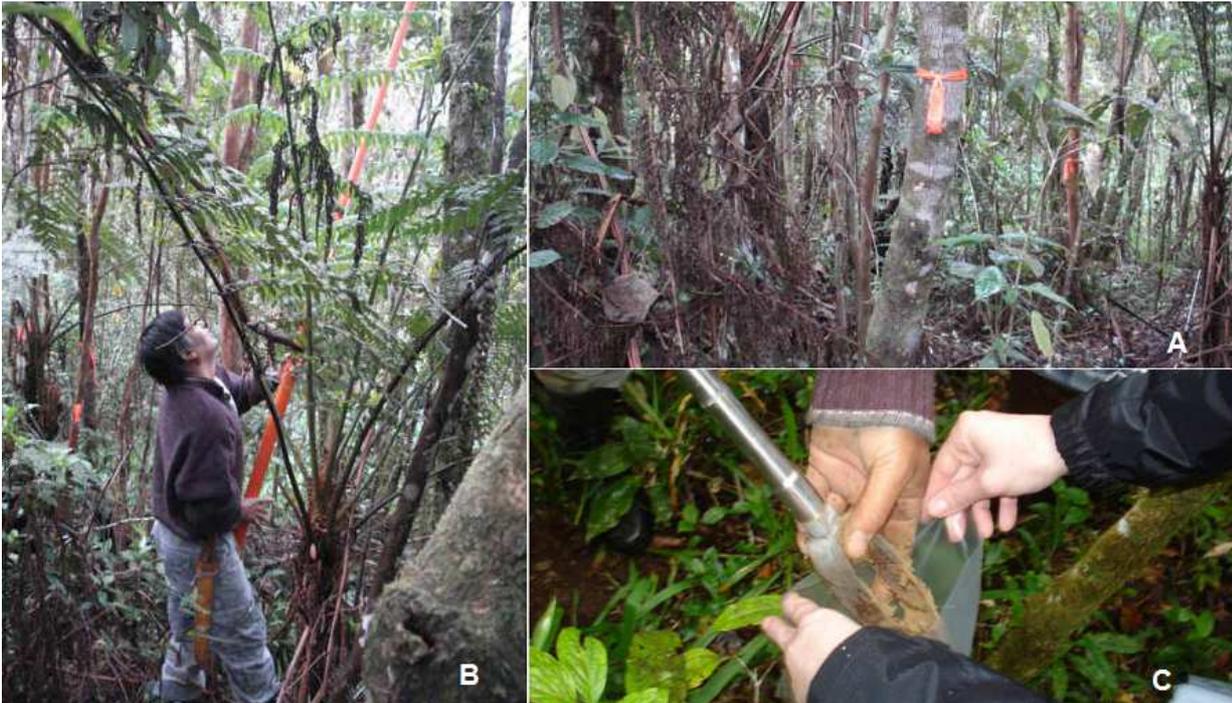


Figura 10 - Procedimentos realizados em campo: (A) marcação dos indivíduos arbóreos amostrados, (B) coleta de folhas e (C) coleta de solo

3.2.2 Período de amostragem

Diversos estudos semelhantes conduzidos no Laboratório de Ecologia Isotópica (CENA/USP) demonstraram que fatores como a sazonalidade das estações seca e chuvosa não interferem significativamente nas composições química e isotópica do solo e do material foliar. Portanto, a maioria das amostras analisadas foi coletada durante os meses mais secos, pela facilidade de acesso ao local durante esse período.

3.3 Análises isotópicas e físico-químicas

As amostras de solo, após secas, foram destorroadas e passadas por peneira de 2mm de diâmetro para remoção de restos vegetais e outras partes não identificadas. Posteriormente, foram homogeneizadas através de um quarteador de Jones e moídas.

O material foliar foi identificado botanicamente e seco em estufa de circulação de ar a 60 °C até alcançar peso constante. As folhas que apresentavam algum sinal

de presença de fungos ou qualquer anormalidade foram desprezadas. Em cada ramo foram selecionadas as folhas maduras que foram moídas a fino pó.

3.3.1 Análise física do solo

As proporções de areia, silte e argila foram determinadas no Departamento de Ciência do Solo (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP) através do método Bouyoucos (densímetro) cujo princípio baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Após a adição de um dispersante químico, fixa-se um tempo único para a determinação da densidade da suspensão e, então, estima-se a concentração total de argila. As frações grosseiras (areia fina e grossa) são separadas por tamisação e pesadas. Após agitação horizontal por 16h, a 120 deslocamento por minuto, determina-se a porcentagem do teor da areia total e da argila, enquanto o silte é obtido pela diferença (silte = 100 - areia total + argila). Utiliza-se como dispersante uma solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio (Camargo et al. 1986). A areia é seca a 110°C, pesada e depois peneirada, obtendo-se as frações.

3.3.2 Determinação de carbono, nitrogênio e da composição isotópica do carbono e nitrogênio estáveis nas folhas e no solo

As amostras foram pesadas em cápsulas de alumínio, sendo 2,5 a 2,7 mg de material foliar e 20-25 mg de solo, e introduzido em um analisador elementar (Carlo Erba modelo 1110; Milão, Itália) para a determinação das concentrações de C e N e das razões isotópicas $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ e $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$. Os gases gerados provenientes da combustão das amostras foram purificados em uma coluna de cromatografia gasosa e, a seguir, carregados ao espectrômetro de massas (IRMS Delta Plus; Finnigan Mat, San Jose, CA, EUA).

As razões isotópicas $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ e $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ foram expressa por meio da equação que segue abaixo, onde R é razão molar $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ ou $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ na amostra e no padrão.

$$\delta^{15}\text{N} \text{ ou } \delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = (R_{\text{amostra}} : R_{\text{padrão}} - 1) \times 1000 \dots \dots \dots (1)$$

O padrão usado para o C é o Peedee Belemnite (PDB; rocha calcária da região do Grand Canyon, EUA), enquanto o padrão para o N é o ar atmosférico. O erro analítico foi de 1%, 0,5%, 0,15‰ e 0,30‰ para o C, N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, respectivamente. Esses erros foram obtidos pela repetição de padrões internos do laboratório de espectrometrias de massas do Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA, onde foram realizadas as análises acima mencionadas.

Para se estimar a contribuição relativa de carbono oriundo de plantas C₄, utilizou-se o modelo de diluição isotópica descrito a seguir:

$$\%C_4 = (\delta^{13}\text{C}_{\text{solo}} - \delta^{13}\text{C}_3) / (\delta^{13}\text{C}_4 - \delta^{13}\text{C}_3) \dots \dots \dots (2)$$

onde, $\delta^{13}\text{C}_{\text{solo}}$ é a composição isotópica do solo e $\delta^{13}\text{C}_3$ é a composição isotópica de amostras de solo que refletem na sua maioria a composição isotópica de plantas C₃. Neste caso foi assumido o valor mais negativo encontrado na transecção (-27.4‰) correspondente ao valor médio encontrado no solo sob floresta nas duas transecções (Tabela 6). Finalmente, $\delta^{13}\text{C}_4$ é a composição isotópica do solo sob pastagem, neste caso foi assumido o valor mais positivo (-13.1‰) encontrado em amostra de solo superficiais coletadas em mais de cem localidades do país por Assad et al. (2013).

3.3.3 Determinação da concentração de fósforo nas folhas

A determinação da concentração de P nas amostras foi realizada através de uma digestão com ácido nítrico e ácido perclórico (proporção 5:1) (JOHNSON; ULRICH, 1959), utilizando 0,5 g de amostra e 6 mL da mistura dos ácidos. Após a digestão, o material foi diluído em 50 mL de água deionizada. A concentração de P foi determinada por espectrofotometria utilizando o reativo “metavanadato de amônio + molibdato de amônio” (LOTT et al., 1956). Para o P, o erro analítico do equipamento é inferior a 1%. Essa análise foi processada no Laboratório de Fertilidade do Solo (Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP).

3.4 Análises estatísticas

Cada transecção foi dividida em três áreas denominadas pastagem, transição e floresta, de acordo com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos a partir da análise das amostras de solo (ver item 4.3).

Os dados foram testados com relação à normalidade (Shapiro) e, quando necessário, transformados através do Box-Cox. Os parâmetros avaliados cujos dados não seguiram uma distribuição normal antes da transformação foram idênticos no Puruba e no Pirapitinga: $\delta^{13}\text{C}$ nas amostras de solo e N, $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ nas amostras de folhas.

Foi utilizada também uma Análise de Variância Multivariada (MANOVA) seguida do teste pos-hoc de Tukey para variâncias não semelhantes. As análises foram realizadas através do pacote estatístico STATISTICA versão 12 para a plataforma WINDOWS (STATSOFT, 2010) e as diferenças iguais ou superiores a 5% foram consideradas significativas.

4 RESULTADOS

4.1 Distribuição das espécies vegetais no Puruba e no Pirapitinga

No Puruba, das 240 amostras de folhas coletadas, 94 eram *Tibouchina sellowiana* (Tabela 1), sendo que a predominância dessa espécie foi evidente na área de transição (Tabela 4). No Pirapitinga, das 172 amostras de folhas coletadas, 25 eram *Psidium cattleianum* e 18 eram *Tibouchina sellowiana* (Tabela 2), sendo que a predominância dessas espécies foi evidente na área de pastagem (Tabela 4).

Tabela 1 - Lista das espécies vegetais amostradas e número de indivíduos encontrados no Puruba, abandonado há 7 anos.

(continua)			
Nome Científico	Família	Autor	7 anos
<i>Tibouchina sellowiana</i>	Melastomataceae	(Cham.) Cogn	94
<i>Guapira opposita</i>	Nyctaginaceae	(Vell.) Reitz	12
<i>Myrsine ferruginea</i>	Primulaceae	(Ruiz & Pav.) Spreng.	12
Não identificada	Não identificada		9
<i>Miconia hymenonervia</i>	Melastomataceae	(Raddi) Cogn.	8
<i>Senna multijuga</i>	Fabaceae	(Rich.) H.S. Irwin & Barneby	8
<i>Baccharis dracunculifolia</i>	Asteraceae	DC.	6
<i>Myrsine umbellata</i>	Primulaceae	(Mart.) Mez	6
<i>Psidium cattleianum</i>	Myrtaceae	Sabine	6
<i>Vernonia polyanthes</i>	Asteraceae	(Spreng.) Less.	6
<i>Baccharis sp.</i>	Asteraceae		5
<i>Myrcia splendens</i>	Myrtaceae	(Sw.) DC.	5
Não identificada	Myrtaceae		5
<i>Piptocarpha sp.</i>	Asteraceae		5
<i>Tibouchina sp.</i>	Melastomataceae		5
<i>Alchornea sidifolia</i>	Euphorbiaceae	Müll. Arg.	4
<i>Cupania vernalis</i>	Sapindaceae	Cambess.	4
<i>Myrsine guianensis</i>	Primulaceae	(Aubl.) Kuntze	3
<i>Myrsine sp.</i>	Primulaceae		3
Não identificada	Asteraceae		3
<i>Alchornea triplinervia</i>	Euphorbiaceae	(Spreng.) Müll. Arg.	2
<i>Casearia sylvestris</i>	Salicaceae	Sw.	2
<i>Clethra scabra</i>	Clethraceae	Pers.	2

Tabela 1 - Lista das espécies vegetais amostradas e número de indivíduos encontrados no Puruba, abandonado há 7 anos.

			(conclusão)
Nome Científico	Família	Autor	7 anos
<i>Myrsine gardneriana</i>	Primulaceae	A. DC.	2
Não identificada	Dilleniaceae		2
<i>Nectandra sp.</i>	Lauraceae		2
<i>Vernonia diffusa</i>	Asteraceae	Less.	2
<i>Cestrum laevigatum</i>	Solanaceae	Schltld.	1
<i>Cordia sp.</i>	Boraginaceae		1
<i>Guatteria nigrescens</i>	Annonaceae	Mart.	1
<i>Ilex sp.</i>	Aquifoliaceae		1
<i>Inga edulis</i>	Fabaceae	Mart.	1
<i>Lonchocarpus cultratus</i>	Fabaceae	(Vell.) A.M.G. Azevedo	1
<i>Miconia cinnamomifolia</i>	Melastomataceae	(DC.) Naudin	1
<i>Miconia petropolitana</i>	Melastomataceae	Cogn.	1
Não identificada	Euphorbiaceae		1
Não identificada	Lauraceae		1
Não identificada	Myrsinaceae		1
<i>Neomitranthes glomerata</i>	Myrtaceae	(D. Legrand) D. Legrand	1
<i>Ocotea divaricata</i>	Lauraceae	(Nees) Mez	1
<i>Ocotea sp.</i>	Lauraceae		1
<i>Pouteria caimito</i>	Sapotaceae	(Ruiz & Pav.) Radlk.	1
<i>Vernonia sp.</i>	Asteraceae		1
<i>Vochysia tucanorum</i>	Vochysiaceae	Mart.	1
TOTAL			240

Tabela 2 - Lista das espécies vegetais amostradas e número de indivíduos encontrados no Pirapitinga, abandonado há 36 anos.

			(continua)
Nome Científico	Família	Autor	36 anos
<i>Tibouchina sellowiana</i>	Melastomataceae	(Cham.) Cogn	18
<i>Psidium cattleianum</i>	Myrtaceae	Sabine	25
Não identificada	Não identificada		16
<i>Annona sp.</i>	Annonaceae		11
<i>Guapira opposita</i>	Nyctaginaceae	(Vell.) Reitz	7
<i>Ocotea silvestris</i>	Lauraceae	Vattimo	7
<i>Psidium myrtoides</i>	Myrtaceae	O. Berg	7
<i>Nectandra membranacea</i>	Lauraceae	(Sw.) Griseb.	5
<i>Trichilia pallida</i>	Meliaceae	Sw.	5
<i>Myrcia splendens</i>	Myrtaceae	(Sw.) DC.	4
<i>Alchornea sidifolia</i>	Euphorbiaceae	Müll. Arg.	4
<i>Alchornea glandulosa</i>	Euphorbiaceae	Poepp.	4

Tabela 2 - Lista das espécies vegetais amostradas e número de indivíduos encontrados no Pirapitinga, abandonado há 36 anos.

			(conclusão)
Nome Científico	Família	Autor	36 anos
<i>Myrsine guianensis</i>	Primulaceae	(Aubl.) Kuntze	3
<i>Nectandra sp.</i>	Lauraceae		3
<i>Cestrum sp.</i>	Solanaceae		3
<i>Clusia criuva</i>	Clusiaceae	Cambess.	3
<i>Inga sp.</i>	Fabaceae		3
<i>Matayba sp.</i>	Sapindaceae		3
<i>Nectandra grandiflora</i>	Lauraceae	Nees & Mart. ex Nees	3
<i>Tetrorchidium rubrivenium</i>	Euphorbiaceae	Poepp.	3
<i>Casearia sylvestris</i>	Salicaceae	Sw.	2
<i>Cordia americana</i>	Boraginaceae	(L.) Gottschling & J.S. Mill.	2
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	Phyllanthaceae	Allemão	2
<i>Miconia cabucu</i>	Melastomataceae	Hoehne	2
<i>Myrcia sp.</i>	Myrtaceae		2
Não identificada	Annonaceae		2
<i>Ocotea velloziana</i>	Lauraceae	(Meisn.) Mez	2
<i>Prunus myrtifolia</i>	Rosaceae	(L.) Urb.	2
<i>Miconia hymenonervia</i>	Melastomataceae	(Raddi) Cogn.	1
Não identificada	Myrtaceae		1
<i>Guatteria nigrescens</i>	Annonaceae	Mart.	1
<i>Annona sylvatica</i>	Annonaceae	A. St.-Hil.	1
<i>Campomanesia neriiflora</i>	Myrtaceae	(O. Berg) Nied.	1
<i>Cordia sellowiana</i>	Boraginaceae	Cham.	1
<i>Cryptocarya sp.</i>	Lauraceae		1
<i>Gochnatia polymorpha</i>	Asteraceae	(Less.) Cabrera	1
<i>Guarea macrophylla</i>	Meliaceae	Vahl	1
<i>Guatteria sp.</i>	Annonaceae		1
<i>Marlierea tomentosa</i>	Myrtaceae	Cambess.	1
<i>Miconia sp.</i>	Melastomataceae		1
<i>Micrandra elata</i>	Euphorbiaceae	(Didr.) Müll. Arg.	1
<i>Mollinedia schottiana</i>	Monimiaceae	(Spreng.) Perkins	1
<i>Psychotria nuda</i>	Rubiaceae	(Cham. & Schltdl.) Wawra	1
<i>Psychotria vellosiana</i>	Rubiaceae	Benth.	1
<i>Roupala montana</i>	Proteaceae	Aubl.	1
<i>Schefflera sp.</i>	Araliaceae	J.R. Forst. & G. Forst.	1
<i>Trichilia catigua</i>	Meliaceae	A. Juss.	1
TOTAL			172

Tabela 3 – Número total de parcelas estabelecidas no Puruba e no Pirapitinga, assim como número total de árvores amostradas e de espécies vegetais identificadas, Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	Parcelas	Árvores amostradas	Espécies
Puruba	40	240	44
Pirapitinga	30	172	47

Tabela 4 – Número de indivíduos arbóreos coletados da espécie *Tibouchina sellowiana* no Puruba e das espécies *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum* no Pirapitinga nas áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F), Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	Nº de indivíduos arbóreos coletados			
	P	T	F	TOTAL
Puruba (TOTAL)	84	111	45	240
Puruba (<i>T. sellowiana</i>)	3	81	10	94
Pirapitinga (TOTAL)	48	59	65	172
Pirapitinga (<i>T. sellowiana</i>)	11	5	2	18
Pirapitinga (<i>P. cattleianum</i>)	16	6	3	25

4.2 Caracterização físico-química do solo

As análises mostraram que o solo é predominantemente arenoso nas duas transecções, apesar de, ao longo delas, apresentar diferenças significativas (Tabela 5). Os teores de argila foram maiores nas áreas de transição e floresta nas duas transecções (Tabela 5). Por outro lado, os teores de areia tiveram tendência oposta, sendo mais elevados nas áreas de pastagem nas duas transecções (Tabela 5).

As somas de bases trocáveis foram, no geral, baixas, não apresentando diferenças significativas ao longo da transecção no Puruba, somente sendo mais elevadas na floresta no Pirapitinga (Tabela 5). A acidez potencial também não apresentou diferença significativa ao longo das duas transecções (Tabela 5).

No Puruba, as concentrações de C aumentaram ao longo da transecção e as concentrações de N foram maiores na floresta do que na pastagem e na transição (Tabela 5). As razões C:N foram menores na pastagem e maiores na transição, sendo que a floresta não diferiu significativamente de nenhuma dessas duas áreas (Tabela 5). As concentrações de P foram maiores na pastagem e menores na transição, sendo que a floresta não diferiu significativamente de nenhuma dessas duas áreas (Tabela 5).

No Pirapitinga, as concentrações de C foram menores na pastagem e maiores na transição, no entanto, a floresta não diferiu significativamente de nenhuma dessas duas áreas e as concentrações de N foram maiores na transição e na floresta do que na pastagem (Tabela 5). As razões C:N foram menores na floresta do que na pastagem e na transição (Tabela 5). As concentrações de P não diferiram significativamente ao longo da transecção (Tabela 5).

Tabela 5 - Características físico-químicas das amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade nas áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F) no Puruba e no Pirapitinga, Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	P	T	F
Areia total (%)			
Puruba	66,3 a	57,1 b	57,7 b
Pirapitinga	76,7 a	56,3 b	62,9 b
Argila (%)			
Puruba	29,7 a	35,6 b	35,4 b
Pirapitinga	18,5 a	37,1 b	30,1 b
SB (mmolc. dm⁻³)			
Puruba	5,7 a	5,5 a	4,9 a
Pirapitinga	4,0 a	5,4 a	14,9 b
H + Al (mmolc. dm⁻³)			
Puruba	130,8 a	139,8 a	137,7 a
Pirapitinga	148,1 a	153,1 a	116,2 a
C (g kg⁻¹)			
Puruba	32,0 ± 3,9 a	37,1 ± 2,7 b	42,8 ± 5,8 c
Pirapitinga	29,2 ± 5,9 a	36,3 ± 3,0 b	33,5 ± 4,2 ab
N (g kg⁻¹)			
Puruba	2,1 ± 0,3 a	2,3 ± 0,1 a	2,8 ± 0,4 b
Pirapitinga	2,0 ± 0,3 a	2,7 ± 0,3 b	2,8 ± 0,4 b
C:N			
Puruba	14,6 ± 0,6 a	15,8 ± 0,8 b	15,2 ± 0,8 ab
Pirapitinga	14,1 ± 1,2 a	13,0 ± 0,7 a	11,8 ± 0,7 b
P (mg. dm⁻³)			
Puruba	9,5 ± 1,5 a	7,8 ± 1,2 b	9,1 ± 2,0 ab
Pirapitinga	15,1 ± 3,2 a	16,5 ± 3,8 a	15,6 ± 2,7 a

Para todas as variáveis estão apresentados os valores médios obtidos. "SB" = soma de bases trocáveis, "H + Al" = acidez potencial, "C" = concentração de carbono, "N" = concentração de nitrogênio, "C:N" = razão C:N, "P" = concentração de fósforo. Letras distintas indicam haver diferença estatística significativa entre as áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F).

4.3 Composição isotópica do nitrogênio e do carbono estáveis no solo

No Puruba, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram maiores na pastagem e na transição do que na floresta (Tabela 6); no entanto, como as diferenças encontradas estão próximas do erro analítico (em torno de 0,5‰), não serão consideradas significativas. Já no Pirapitinga não houve diferença significativa entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas três áreas (Tabela 6).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ tiveram um padrão de variação semelhante no Puruba e no Pirapitinga, apresentando-se maiores nas pastagens, intermediários nas áreas de transição e menores nas florestas (Tabela 6). Esse parâmetro foi utilizado para determinação da dimensão de cada uma das três áreas no decorrer das transecções (Figuras 11 e 12), sendo que, no Puruba, a pastagem, a área de transição e a floresta ocuparam as parcelas de 1 a 7 (0-70 m), de 8 a 16 (70-160 m) e de 17 a 20 (160-200 m), respectivamente (Figura 11). No Pirapitinga, a pastagem, a área de transição e a floresta ocuparam as parcelas de 1 a 4 (0-40 m), de 5 a 9 (40-90 m) e de 10 a 15 (90-150 m), nessa ordem (Figura 12). No Puruba, a pastagem, a transição e a floresta ocupam 700 m² (70 m x 10 m), 900 m² (90 m x 10 m) e 400 m² (40 m x 10 m), respectivamente. No Pirapitinga, a pastagem, a transição e a floresta ocupam 400 m² (40 m x 10 m), 500 m² (50 m x 10 m) e 600 m² (60 m x 10 m), nesta ordem.

Tabela 6 - Composição isotópica do nitrogênio, expressa na notação $\delta^{15}\text{N}$, e do carbono, expressa na notação $\delta^{13}\text{C}$, das amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade nas áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F) no Puruba e no Pirapitinga, Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	P	T	F
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)			
Puruba	6,4 ± 0,3 a	6,5 ± 0,3 a	5,9 ± 0,7 b
Pirapitinga	6,0 ± 0,4 a	6,2 ± 0,3 a	6,0 ± 0,4 a
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			
Puruba	-22,6 ± 2,0 a	-25,2 ± 0,7 b	-27,3 ± 0,4 c
Pirapitinga	-23,0 ± 1,3 a	-26,5 ± 0,9 b	-27,5 ± 0,5 c

Para todas as variáveis estão apresentados os valores médios obtidos. Letras distintas indicam haver diferença estatística significativa entre as áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F).

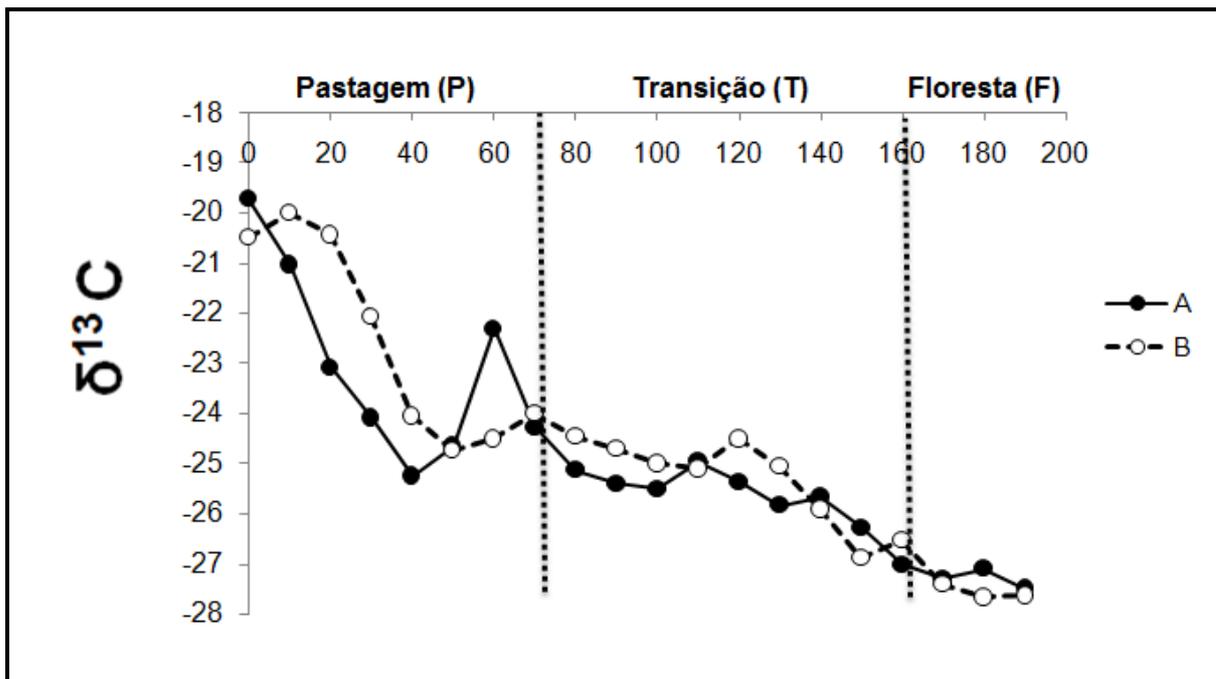


Figura 11 - Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas amostras de solo ao longo das transecções A e B no Puruba: I. Pastagem – Parcelas 1 a 7 (0-70 m); II. Transição – Parcelas 8 a 16 (70-160 m); Floresta – Parcelas 17 a 20 (160-200 m)

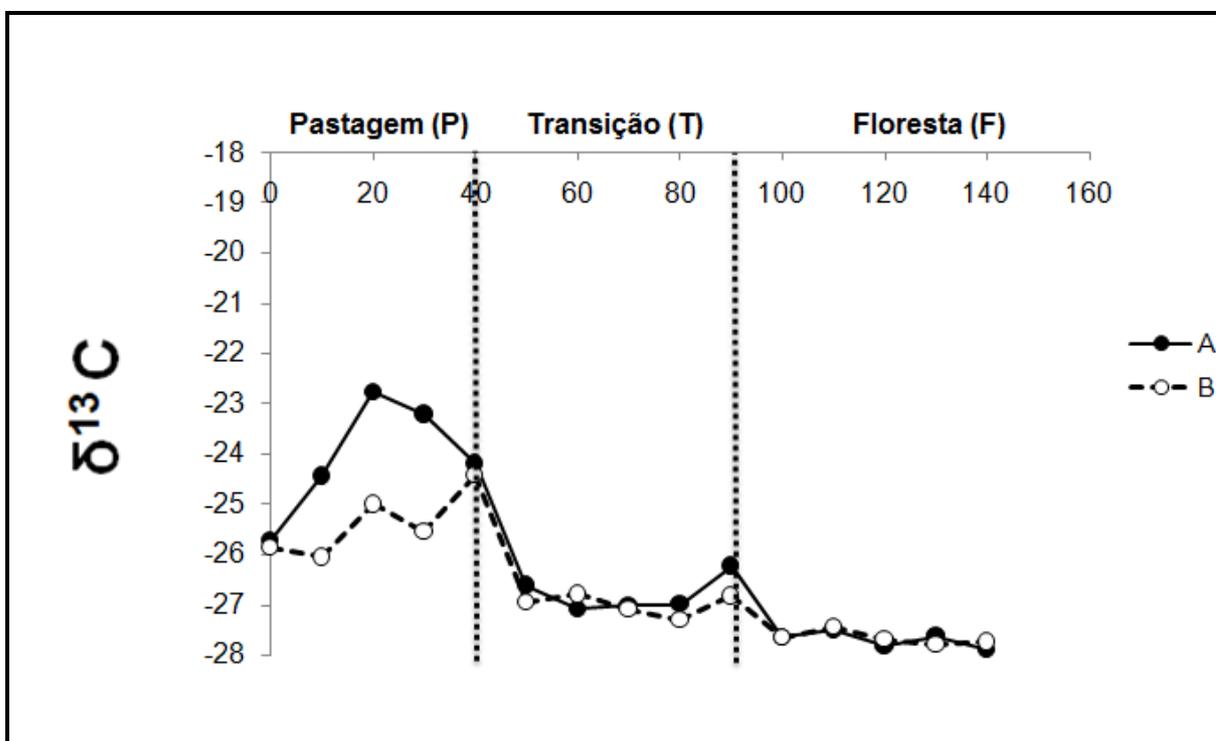


Figura 12 - Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas amostras de solo ao longo das transecções A e B no Pirapitinga: I. Pastagem – Parcelas 1 a 4 (0-40 m); II. Transição – Parcelas 5 a 9 (40-90 m); Floresta – Parcelas 10 a 15 (90-150 m)

4.4 Determinação da concentração de carbono, nitrogênio e fósforo, bem como da composição isotópica do nitrogênio e do carbono estáveis nas folhas

No Puruba, as concentrações de N foliar foram menores na transição do que na pastagem e na floresta, e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ não apresentaram diferença significativa entre as três áreas (Tabela 7). As concentrações de C foliar apresentaram-se maiores na pastagem e menores na transição, sendo que a floresta não diferiu significativamente de nenhuma dessas duas áreas, e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram intermediários na pastagem, maiores na transição e menores na floresta (Tabela 7). As razões C:N foram menores na pastagem e na floresta e maiores na transição (Tabela 7).

No Pirapitinga, as concentrações de N foliar foram menores na pastagem, intermediárias na transição e maiores na floresta, e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram menores na pastagem e maiores na floresta, sendo que a transição não diferiu significativamente de nenhuma dessas duas áreas (Tabela 7). As concentrações de C foliar não variaram ao longo da transecção e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram maiores na pastagem, intermediários na transição e menores na floresta (Tabela 7). As razões C:N foram menores na transição e na floresta e maiores na pastagem (Tabela 7).

Tabela 7 – Determinação da concentração de nitrogênio, carbono e fósforo, da razões C:N e N:P e da composição isotópica do nitrogênio, expressa na notação $\delta^{15}\text{N}$, e do carbono, expressa na notação $\delta^{13}\text{C}$, nas folhas coletadas nas áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F) no Puruba e no Pirapitinga, Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	P	T	F
N (g kg⁻¹)			
Puruba	23,9 ± 0,4 a	17,2 ± 0,2 b	27,0 ± 0,8 a
Pirapitinga	15,7 ± 1,9 a	23,3 ± 0,4 b	25,6 ± 0,4 b
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)			
Puruba	2,2 ± 0,8 a	2,3 ± 0,5 a	2,5 ± 1,3 a
Pirapitinga	0,6 ± 0,9 a	1,6 ± 1,0 ab	1,8 ± 1,3 b
C (g kg⁻¹)			
Puruba	460,4 ± 11,8 a	434,6 ± 13,2 b	445,3 ± 15,7 ab
Pirapitinga	461,5 ± 16,7 a	455,4 ± 7,4 a	452,2 ± 8,8 a
$\delta^{13}\text{C}$ (‰) – C₃			
Puruba	-30,2 ± 0,4 a	-29,5 ± 0,6 b	-31,5 ± 1,3 c
Pirapitinga	-29,9 ± 0,5 a	-31,1 ± 0,9 b	-32,8 ± 1,2 c
C:N			
Puruba	19,8 ± 3,3 a	25,5 ± 2,3 b	17,6 ± 4,3 a
Pirapitinga	29,7 ± 3,5 a	20,0 ± 3,4 b	18,2 ± 3,3 b
P (g kg⁻¹)			
Puruba	1,5 ± 0,4 a	0,6 ± 0,1 b	0,8 ± 0,2 b
Pirapitinga	1,0 ± 0,4 a	1,1 ± 0,3 a	1,2 ± 0,3 a
N:P			
Puruba	16,6 ± 3,4 a	27,4 ± 3,9 b	37,0 ± 12,0 c
Pirapitinga	18,3 ± 5,4 a	22,4 ± 6,3 a	21,9 ± 6,1 a

Para todas as variáveis estão apresentados os valores médios obtidos. “N” = concentração de nitrogênio, “ $\delta^{15}\text{N}$ ” = composição isotópica do nitrogênio, “C” = concentração de carbono, “ $\delta^{13}\text{C}$ ” = composição isotópica do carbono, “C:N” = razão C:N, “P” = concentração de fósforo, “N:P” = razão N:P. Letras distintas indicam haver diferença estatística significativa entre as áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F).

4.5 Determinação da concentração de nitrogênio, da razão C:N e da composição isotópica do nitrogênio estável nas folhas de *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum*

No Puruba havia apenas três espécimes de *Tibouchina sellowiana* na pastagem, por isso, foram comparadas as áreas de transição e floresta. As concentrações de N foliar foram menores na transição do que na floresta, assim como os valores de C:N e de $\delta^{15}\text{N}$ (Tabela 8).

No Pirapitinga havia apenas três espécimes de *Tibouchina sellowiana* e de *Psidium cattleianum* na floresta, no total 6 indivíduos arbóreos, por isso, foram comparadas as áreas de pastagem e transição. As análises das folhas de *Tibouchina sellowiana* indicaram que as concentrações de N foram menores na pastagem do que na transição, a razão C:N não variou significativamente ao longo da transecção e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram maiores na pastagem do que na transição (Tabela 8). As análises das folhas de *Psidium cattleianum* indicaram que as concentrações de N foram menores na pastagem do que na transição, a razão C:N foi menor na pastagem do que na transição e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ não variaram significativamente ao longo da transecção (Tabela 8).

Tabela 8 – Determinação da concentração de nitrogênio, da razão C:N e da composição isotópica do nitrogênio estável, expressa na notação $\delta^{15}\text{N}$, nas folhas de *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum* coletadas nas áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F) no Puruba e no Pirapitinga, Núcleo Santa Virgínia, Parque Estadual da Serra do Mar – SP

	P	T	F
N (g kg⁻¹)			
Puruba (<i>T. sellowiana</i>)	-	16 a	19 b
Pirapitinga (<i>T. sellowiana</i>)	15 a	20 b	-
Pirapitinga (<i>P. cattleianum</i>)	11 a	13 b	-
C:N			
Puruba (<i>T. sellowiana</i>)	-	22 a	26 b
Pirapitinga (<i>T. sellowiana</i>)	30 a	25 a	-
Pirapitinga (<i>P. cattleianum</i>)	44 a	25 b	-
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)			
Puruba (<i>T. sellowiana</i>)	-	2,4 a	2,7 b
Pirapitinga (<i>T. sellowiana</i>)	2,5 a	0,8 b	-
Pirapitinga (<i>P. cattleianum</i>)	-1,2 a	-1,1 a	-

Para todas as variáveis estão apresentados os valores médios obtidos. “N” = concentração de nitrogênio, “C:N” = razão C:N, “ $\delta^{15}\text{N}$ ” = composição isotópica do nitrogênio. Letras distintas indicam haver diferença estatística significativa entre as áreas denominadas pastagem (P), transição (T) e floresta (F).

5 DISCUSSÃO

Inicialmente, duas hipóteses foram levantadas. A primeira delas relacionava-se à cobertura do solo no Puruba e no Pirapitinga. Esperava-se que a composição isotópica do C na matéria orgânica do solo, expressa na notação $\delta^{13}\text{C}$, indicaria, ao longo das transecções, a substituição das antigas pastagens, que ainda predominam nas partes mais baixas do terreno, pelas florestas secundárias que vêm se recompondo nas partes mais elevadas.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo diminuíram ao longo das transecções tanto no Puruba como no Pirapitinga, e indicam que a principal fonte de matéria orgânica para o solo vai sendo modificada conforme se avança na transecção: nas partes mais baixas do terreno coexistem gramíneas (C_4) remanescentes da antiga pastagem e algumas espécies arbóreas (C_3) que vêm se desenvolvendo no local; nas áreas de transição há uma maior participação das espécies do tipo C_3 ; nas partes mais elevadas, os valores obtidos refletem a ocupação da área pelas espécies que constituem a floresta secundária em desenvolvimento (Figuras 11 e 12).

Apesar da paisagem no núcleo Santa Virgínia ainda se apresentar na forma de mosaicos compostos por florestas maduras, pastagens, plantios de *Eucalyptus* spp. e florestas secundárias com diferentes idades de regeneração (TABARELLI; MANTOVANI, 1999a), tanto no Puruba quanto no Pirapitinga, a matéria orgânica produzida pela vegetação secundária, predominantemente C_3 , vem paulatinamente substituindo a matéria orgânica proveniente da antiga vegetação C_4 nessas duas transecções, sendo isso mais evidente nas partes mais elevadas. Conclui-se, portanto, apoiando a primeira hipótese levantada, que há semelhança entre as duas transecções em termos de padrão de ocupação.

Ainda que exista no Puruba e no Pirapitinga um padrão de ocupação semelhante, a dimensão de cada uma das três áreas no decorrer das transecções é diferente. No Puruba, a maior área é a transição, ocupando 900 m² de um total de 2.000 m², enquanto no Pirapitinga, a maior área é a floresta, ocupando 600 m² de um total de 1.500 m². Além disso, as espécies predominantes no Puruba e no Pirapitinga estabeleceram-se no terreno de maneira diferente. No Puruba, a *Tibouchina sellowiana* concentra-se na área de transição, representando 73 % da vegetação encontrada nesse local. Já no Pirapitinga, o maior número de indivíduos

pertencentes às espécies *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum* encontram-se na pastagem e ocupam, respectivamente, 23 % e 33 % dessa parte do terreno.

Embora não contemplada no presente estudo, a análise de $\delta^{13}\text{C}$ nas camadas mais profundas do solo pode fornecer informações sobre as transformações da vegetação ao longo do tempo (MARTINELLI et al., 2009). Conforme Juliana Antonio (resultados não publicados), que avaliou a biomassa radicular nas profundidades 0-10, 20-30 e 50-60 cm no Puruba, o sinal isotópico das raízes refletiu nas três profundidades amostradas o padrão de ocupação do solo já mencionado, todavia, nem mesmo nas camadas mais profundas, as áreas ocupadas por *Tibouchina sellowiana* e floresta secundária evidenciaram contribuição de espécies vegetais do tipo C_4 . Assim, questiona-se sobre a distribuição das antigas pastagens nas partes mais elevadas do terreno.

As médias obtidas nas pastagens assemelham-se às observadas por Bernoux et al. (1999) em pastagens de 10 e 15 anos localizadas em Paragominas (PA), as quais foram -23,9 ‰ e -22,4 ‰, nesta ordem. Por outro lado, o valor médio do $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo em amostras coletadas em mais de cem pastagens localizadas em várias regiões do Brasil e de várias idades foi de $-18,3 \pm 2,3$ ‰ (ASSAD et al., 2013). Utilizando-se um modelo de mistura semelhante ao utilizado neste estudo (equação 2), Assad et al. (2013) estimaram uma contribuição relativa de plantas C_4 de 0,58; enquanto neste estudo utilizando-se os valores médios de amostras de solo sob pastagens nas transecções do Puruba (-22,6 ‰) e Pirapitinga (-23,0 ‰) e o modelo de mistura (equação 2), estimou-se a contribuição relativa de plantas C_4 em aproximadamente 0,34 e 0,31, respectivamente. Provavelmente, a maior contribuição de plantas C_4 observada por Assad et al. (2013) esteja correlacionada com a idade e o manejo das pastagens; lembrando-se que os solos coletados por esses autores encontravam-se em pastagens em uso, enquanto, no Puruba e no Pirapitinga, as pastagens foram abandonadas já há algum tempo. Na zona de transição, dominada pela *Tibouchina*, a contribuição média de C oriundo de plantas C_4 , estimada pela equação 2, diminuiu sensivelmente, decrescendo para apenas para 0,15 no Puruba e para menos de 0,10 no Pirapitinga.

Os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ encontrados nas duas transecções nos solos sob floresta (Tabela 6) denotam claramente que a matéria orgânica nesses solos parece ser originária de plantas exclusivamente pertencentes ao ciclo C_3 . Os valores médios de -27,5 ‰ e -27,4 ‰ encontrados nos solos sob floresta do Puruba e Pirapitinga,

respectivamente, são muito similares ao valor de $\delta^{13}\text{C}$ médio encontrado em solos superficiais sob florestas primárias situadas há poucos quilômetros dessas duas transecções ($-27,9 \pm 0,5 \text{ ‰}$) (MARTINS, 2010).

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ dos solos mostraram uma variação menos acentuada que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ ao longo das transecções. Sendo os valores encontrados em solos sob floresta de $5,9 \text{ ‰}$ e $6,0 \text{ ‰}$ no Puruba e Pirapitinga, respectivamente, foram semelhantes aos valores encontrados em solos superficiais sob florestas primárias coletados próximos às transecções avaliadas neste estudo ($5,8 \pm 1,2 \text{ ‰}$) (MARTINS, 2010).

Existe a possibilidade que a crescente dominância de C de origem C_3 ao longo das duas transecções tenha levado a outras alterações na composição química do solo. No entanto, as duas únicas tendências significativas, foram aumentos nos teores de C e N ao longo das transecções. Essa tendência de enriquecimento da matéria orgânica do solo foi também encontrada em estudos sobre restauração florestal conduzidos em áreas de Mata Atlântica. O motivo principal no aumento dos teores de matéria orgânica no solo foram os aumentos nas entradas de C e N pelo aumento na queda de folhas (MACEDO et al., 2008; NOGUEIRA et al., 2013).

Relacionada à dinâmica do N, a outra hipótese aqui levantada baseou-se nas constatações de Davidson et al. (2007), que compararam a composição foliar de florestas secundárias de diferentes idades, situadas na Amazônia brasileira, e uma floresta primária, a qual foi utilizada como referência. Esses autores demonstraram que conforme as florestas secundárias tornavam-se mais antigas uma série de modificações na composição foliar indicavam um aumento da disponibilidade de N no sistema, paralelamente a uma redução da disponibilidade de fósforo. Consequentemente, foi observado que o teor de N nas folhas aumentou, enquanto a relação N:P tornou-se maior e os valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais elevados nas florestas secundárias mais antigas (DAVIDSON et al., 2007). Conforme as idades das florestas secundárias avançam e enriquecem em N, as perdas desse nutriente tornam-se maiores, e como há um fracionamento isotópico nessas perdas, o substrato torna-se enriquecido em átomos de ^{15}N , aumentando, consequentemente, os valores foliares de $\delta^{15}\text{N}$ (MARTINELLI et al., 2009; CRAINE et al., 2009). Essas mesmas tendências foram observadas por Siddique et al. (2008) e por Amazonas et al. (2011) em projetos de restauração florestal no Estado de São Paulo. Nesses

estudos, foi demonstrado que o enriquecimento em N foi provavelmente devido à fixação biológica de N. Recentemente, Batterman et al. (2013) demonstraram a importância da fixação biológica de N em florestas secundárias de diferentes idades na Costa Rica. Boeger, Wisniewski e Reissmann (2005), avaliando as modificações ocorridas na comunidade vegetal e no solo em três estágios sucessionais distintos em Terras Baixas da Floresta Ombrófila Densa, constatou que a razão C:N nas folhas tende a diminuir à medida que a sucessão avança.

Portanto, baseando-se nesses estudos anteriores, esperava-se encontrar as mesmas tendências, ou seja um aumento no teor de N foliar, seguido por um aumento a relação foliar N:P e uma diminuição na relação foliar C:N, culminando com um aumento nos valores foliar de $\delta^{15}\text{N}$ ao longo da transecção, tanto no Puruba quanto no Pirapitinga.

Comparando-se o conjunto de espécies coletadas em cada porção das transecções, as tendências encontradas não foram tão evidentes quanto nos artigos supracitados (DAVIDSON et al., 2007; SIDDIQUE et al., 2008; AMAZONAS et al., 2011). No Puruba, as plantas da área de transição (na sua maioria *Tibouchina*) tiveram teores de N menores e C:N maiores que as plantas da área de pastagem e floresta (Tabela 7). Somente a relação N:P na transecção do Puruba teve o comportamento esperado, aumentando da pastagem para a transição e para a floresta secundária (Tabela 7). Finalmente, os valores de foliares de $\delta^{15}\text{N}$ não variaram entre as porções das transecções, sendo que o esperado seria um aumento ao longo da transecção.

No Pirapitinga, os teores de N foliares foram menores na área de pastagem, aumentando significativamente na área de transição e floresta, que por sua vez, não foram distintos entre si (Tabela 7).

Os teores de N nas espécies arbóreas amostras nas florestas do Puruba ($27,0 \text{ g kg}^{-1}$) e Pirapitinga ($25,6 \text{ g kg}^{-1}$) foram próximas ao teor encontrado em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Densa Montana, igual a 28 g kg^{-1} (LINS, 2013). A relação C:N e a relação N:P foram também semelhantes à floresta primária. As razões médias foliares de C:N foram aproximadamente 17,6 e 18,2 no Puruba e Pirapitinga, respectivamente, e 19,1 na Floresta Ombrófila Densa (LINS, 2013). A foliar média N:P foi na Floresta Ombrófila Densa aproximadamente igual a 30 (LINS, 2013), sendo igual a 37 no Puruba e maior do que 20 no Pirapitinga (Tabela 7). Finalmente, o valor médio de $\delta^{15}\text{N}$ da floresta primária foi de 1,6 ‰ (LINS, 2013),

próximo ao valor médio encontrado na porção florestal do Pirapitinga (1,8 ‰). Por outro lado, o valor médio foliar no Puruba na porção florestal (2,5 ‰) foi maior que na floresta primária.

As comparações acima foram feitas entre as médias obtidas para todos os espécimes arbóreos amostrados, os quais pertenciam a diferentes espécies. Considerando que a variabilidade interespecífica pode ser alta, mascarando possíveis tendências ao longo das transecções, analisou-se a composição elementar foliar contemplando exclusivamente indivíduos de *Tibouchina sellowiana* no Puruba e *Tibouchina sellowiana* e *Psidium cattleianum* no Pirapitinga (Tabela 8) com a finalidade de comparar os valores obtidos para os parâmetros teor de N, relação N:P e $\delta^{15}\text{N}$ para a mesma espécie ao longo das transecções.

O teor de médio N de *T. sellowiana* na transição do Puruba foi significativamente menor que na floresta, conforme o previsto por Davidson et al. (2007), mas a relação C:N que era esperada decrescer, aumentou na floresta em relação a transição (Tabela 8). Finalmente, o valor de $\delta^{15}\text{N}$ foi maior nas folhas de *T. sellowiana* na floresta que na transição (Tabela 8). Mas, essa diferença foi pequena, próxima ao erro analítico do instrumento e não deve ser considerada. Na transecção do Pirapitinga, *T. sellowiana* e *P. cattleianum* ocorreram na área de pastagem e na transição. Em ambas as espécies o teor de N foi maior na transição que na pastagem e a relação C:N menor, como proposto por Davidson et al. (2007). Mas os valores de $\delta^{15}\text{N}$ não seguiram a tendência esperada de aumento da pastagem para a transição (Tabela 8).

No Pirapitinga, as razões C:N dos espécimes de *Psidium cattleianum* na pastagem (44) foram semelhantes às encontradas por Boeger, Wisniewski e Reissmann (2005) no estágios inicial (48) e intermediário (45) da sucessão. Da mesma forma, as concentrações de N nas folhas de *Psidium cattleianum* na pastagem (11 g kg⁻¹) e na transição (13 g kg⁻¹) assemelham-se às obtidas para a mesma espécie por Boeger, Wisniewski e Reissmann (2005) nos estágios inicial (10,3 g kg⁻¹) e intermediário (10,7 g kg⁻¹) da sucessão.

Nos ecossistemas terrestres os nutrientes mais limitantes são o N e o P (VITOUSEK et al., 2010). Durante o processo sucessional, à medida que a sucessão avança, as propriedades do ciclo de N vão sendo recuperadas, o sistema se torna auto-suficiente em N e as plantas tornam-se mais limitadas por P (CHADWICK et al., 1999; AMAZONAS et al., 2011; VITOUSEK; MATSON; CLEVE, 1989; MARTINELLI

et al., 1999; WALKER; SYERS, 1976; HEDIN; VITOUSEK; MATSON, 2003; DAVIDSON et al., 2007). Como consequência, ocorre aumento da razão N:P (MARTINELLI et al., 1999; NARDOTO et al., 2008). Esse parâmetro pode contribuir para a compreensão do estado nutricional da vegetação, sendo que $N:P < 14$ indica maior limitação por N, $14 < N:P < 16$ indica limitação tanto por N quanto por P e $N:P > 16$ indica limitação por P (AERTS; CHAPIN III, 2000). Todavia, a heterogeneidade ambiental que há nas florestas tropicais em termos de fertilidade do solo, clima e diversidade de espécies vegetais dificulta o estabelecimento de padrões gerais sobre limitação nutricional nesse bioma (TOWNSEND et al. 2007).

No Puruba e no Pirapitinga todas as áreas apresentaram razões N:P superiores a 16 (Tabela 7), assim como constatou LINS (2013), que obteve 40 em uma floresta Montana no núcleo Santa Virgínia do Parque Estadual da Serra do Mar. Townsend et al. (2007), avaliando trabalhos realizados em florestas tropicais do Brasil e da Costa Rica, constataram grande diversidade de resultados uma vez que as razões N:P apresentaram média de $19,5 \pm 6,7$, variando de 7,5 a 43,5. No Puruba, entre as áreas de pastagem, transição e floresta, esses valores aumentaram, enquanto no Pirapitinga não houve mudanças significativas ao longo da transecção. Considerando que as reduzidas concentrações de P também foram reveladas na análise química do solo, tanto no Puruba quanto no Pirapitinga há, possivelmente, maior limitação por P do que por N e, no Puruba, as partes mais baixas do terreno podem ser mais limitadas por P do que as mais elevadas. Entretanto, diante do fato de que a razão N:P é muito mais influenciada pelas espécies vegetais do que outros atributos ambientais (TOWNSEND et al. 2007), e que as amostras foliares foram coletadas aleatoriamente nas áreas contempladas neste estudo, os valores apresentados podem não estar refletindo a comunidade vegetal como um todo.

Apesar de o padrão geral para a evolução da dinâmica do N durante a sucessão secundária ser caracterizado por uma baixa disponibilidade inicial de N, com aumento gradual da concentração do nutriente no decorrer do processo sucessional até mesmo em áreas agrícolas abandonadas (AMAZONAS et al. 2011; VITOUSEK; MATSON; CLEVE, 1989; DAVIDSON et al., 2007), Vitousek et al. (1989), comparando diversos estudos sobre a variação da concentração de N e a intensidade dos processos de mineralização e nitrificação durante as sucessões primária e secundária, concluíram que a dinâmica desse nutriente nem sempre

segue padrões claros e que, quando se trata de áreas agrícolas cuja atividade agropecuária foi prolongada, tais padrões são ainda mais variáveis do que em áreas que sofreram algum tipo de exploração, como o corte raso da floresta, e foram abandonadas logo em seguida. Essa variabilidade está, segundo eles, relacionada em grande parte às diferenças no histórico de perturbação. Talvez, a falta de padrões claros ao longo das transecções, como encontrado em outros estudos desenvolvidos no país (DAVIDSON et al., 2007; SIDDIQUE et al., 2008; AMAZONAS et al., 2011) resida no fato de este estudo ter contemplado áreas de pastagens que ainda não se tornaram formações florestais propriamente ditas, onde a colonização por plantas C₃ ainda está em seu início, apesar da elevada proporção de C de origem C₃ ter sido incorporada ao solo.

Esse trabalho mostrou algumas mudanças que ocorrem no ciclo do N ao longo das transecções, no entanto, restam ainda várias dúvidas. Os resultados obtidos não proporcionam um entendimento completo dos fatores que contribuíram para o estabelecimento do padrão de ocupação observado nas áreas estudadas. A paisagem tanto no Puruba, abandonado há 7 anos, quanto no Pirapitinga, abandonado há 36 anos, está relacionada às espécies que lá existem, ou seria determinada por condições ambientais relacionadas à luz, disponibilidade de água ou nutrientes?

A *Tibouchina sellowiana* é uma espécie pioneira (CARVALHO, 2010) e a *Psidium cattleianum* é secundária inicial, tendo sido encontrada por Boeger, Wisniewski e Reissmann (2005) nos estádios inicial e intermediário de sucessão. As espécies pioneiras, durante a sucessão secundária, tendem a restaurar a fonte de nutrientes no sistema, o que significa que devem possuir requerimentos nutricionais muito baixos, além de usarem mecanismos muito eficientes para utilização dos nutrientes que se encontram em pequena quantidade no solo, o que explicaria porque algumas delas conseguem se estabelecer em solos inférteis (GÓMEZ-POMPA; VÁSQUEZ-YANES, 1981). Apesar de serem escassas na literatura informações sobre exigência nutricional por espécie, Braga et al. (1995), em experimento com nutrientes em solos de baixa fertilidade, concluíram que a *Tibouchina granulosa* mostrou alto requerimento nutricional respondendo à adubação com todos os macronutrientes, incluindo N e P. Por pertencer ao mesmo gênero, é possível que a *Tibouchina sellowiana* também apresente essa característica mas, mesmo diante disso, essa espécie adaptou-se às áreas de

transição no Puruba e de pastagem do Pirapitinga, onde parece existir menor disponibilidade de N.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Duas hipóteses principais foram levantadas neste estudo. A primeira delas foi corroborada pelos resultados obtidos. Realmente, a determinação da composição isotópica do C ($\delta^{13}\text{C}$) mostrou-se um bom indicador da mudança do uso do solo, demonstrando que, de fato, existe semelhança no que se refere ao padrão de ocupação no Puruba e no Pirapitinga, mesmo em se tratando de duas áreas com tempos de abandono distintos. Nas duas áreas, as partes mais baixas do terreno ainda são ocupadas por pastagem, enquanto nas mais altas há uma vegetação mais diversificada e de maior porte, com o sub-bosque mais desenvolvido, caracterizando-se como uma floresta secundária.

A segunda hipótese, com relação à dinâmica do nitrogênio, não foi confirmada. As tendências encontradas não foram tão evidentes quanto o esperado. É possível que a falta de padrões claros ao longo das transecções, como encontrado em outros estudos, resida no fato de este trabalho ter contemplado áreas de pastagens que ainda não se tornaram formações florestais propriamente ditas, onde a colonização por plantas C_3 ainda está em seu início, apesar da elevada proporção de C de origem C_3 já ter sido incorporada ao solo.

Outros estudos relacionados a esse tema em áreas cujo histórico de uso e ocupação do solo estivesse detalhadamente documentado seriam relevantes para possibilitar a verificação da existência ou não de padrões relacionados à ciclagem biogeoquímica de nutrientes, com ênfase no N, em ambientes que sofreram intervenções antrópicas e consequente degradação por longos períodos de tempo.

REFERÊNCIAS

- AERTS, R.; CHAPIN III, F.S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. **Advances in Ecological Research**, San Diego, v. 30, p. 1-67, 2000.
- AMAZONAS, N.T. **Ciclagem do nitrogênio em uma cronosequência formada por florestas restauradas e floresta natural**. 2010. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2010.
- AMAZONAS, N.T.; MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; RODRIGUES, R.R. Nitrogen dynamics during ecosystem development in tropical forest restoration. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, p. 1551-1557, 2011.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; MARTINS, S.C.; GROppo, J.D.; SALGADO, P.R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E.E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P.B.; MARTINELLI, L.A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, Germany, v. 10, p. 6141-6160, 2013.
- BATTERMAN, S.A.; HEDIN, L.O., VAN BREUGEL, M.; RANSIJN, J.; CRAEVEN, D. J.; HALL, J.S. Key role of symbiotic dinitrogen fixation in tropical forest secondary succession. **Nature**, London, v. 502, p. 224-227. doi: 10.1038/nature12525. 2013.
- BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C.; GERALDES, A.P.A.; FERNANDES, S.A.P. Carbono e nitrogênio em solo em uma cronosequência de floresta tropical – pastagem de Paragominas. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, p. 8, 1999.
- BOEGER, M.R.T.; WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C.B. Nutrientes foliares de espécies arbóreas de três estádios sucessionais de Floresta Ombrófila Densa no sul do Brasil. **Acta Botânica Brasileira**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 167-181, 2005.
- BOUTTON, T.W. Stable carbon isotope ratios of natural materials: atmospheric, terrestrial, marine and freshwater environments. In: COLEMAN, D.C.; FRY, B. (Ed.). **Carbon isotope techniques**. New York: Academic Press, 1991. p. 173-185.
- BRAGA, F. de A.; VALE, F.R. do; VENTURIN, N.; AUBERT, E.; LOPES G. de A. Exigências nutricionais de quatro espécies florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.19, n.1, p.18-31, 1995.
- BRANCALION, P.H.S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R.R. Uma visão ecossistêmica do processo de restauração ecológica. In: RODRIGUES, R.R.; BRANCALION, P.H.S. ISERNHAGEN, I. (Org.). **Pacto pela restauração da Mata Atlântica**: Referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BIOATLÂNTICA, 2009. 256p.
- CÂMARA, I.G. Brief history of conservation in the Atlantic Forest. In: GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I.G. (Ed.). **The Atlantic Forest of South America**: biodiversity, status, threats, and outlook. Washington, 2003. p. 31-42.

- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p.
- CAMARGO, P.B.; TRUMBORE, S.; MARTINELLI, L.A.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VICTORIA, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, Oxford, v. 5, p. 693-702, 1999.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2010. v. 4, p. 473-480.
- CENTURION, J.F.; CARDOSO, J.P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 416-424, 2001.
- CERRI, C.C. **Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo no Agrossistema de Cana-de-açúcar**. 1986. 289p. Tese (Livre-Docência em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- CHADWICK, O.A.; DERRY, L.A.; VITOUSEK, P.M.; HUEBERT, B.J.; HEDIN, L.O. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. **Nature**, London, v. 397, p. 491-497, 1999.
- CHAPIN III, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A. Terrestrial nutrient cycling. In: _____. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer-Verlag, 2002. cap.9, p. 197-223.
- CHAZDON, R.L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **Science**, Washington, v. 320, p. 1458-1460, 2008.
- 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**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 195-203, 2010.

CRAINE, J.M.; ELMORE, A.J.; AIDAR, M.P.M.; BUSTAMANTE, M.; DAWSON, T.E.; HOBBIE, E.A. KAHMEN, A.; MACK, M. C.; McLAUCHLAN, K.K.; MICHELSEN, A.; NARDOTO, G.B.; PARDO, L.H.; PEÑUELAS, J.; REICH, P.B.; SCHUUR, E.A.G.; STOCK, W.D.; TEMPLER, P.H.; VIRGINIA, R.A.; WELKER, J.M.; WRIGHT, I.J. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. **New Phytologist**, Lancaster, v. 183, p. 980-992, 2009.

DAVIDSON, E.A.; CARVALHO, C.J.R.D.; FIGUEIRA, A.M.; ISHIDA, F.Y.; OMETTO, J.P.H.B.; NARDOTO, G.B.; SABÁ, R.T.; HAYASHI, S.N.; LEAL, E.C.; VIEIRA, I.C. G.; MARTINELLI, L.A. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. **Nature**, London, v. 447, p. 995-999, 2007.

DAVIDSON, E.A.; CARVALHO, J.R.; VIEIRA, I.C.G.; FIGUEIREDO, P.M.; ISHIDA, F. Y.; SANTOS, M.T.P.; GUERRERO, J.B.; KALIF, K.; SABÁ, R.T. Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. **Ecological Applications**, Tempe, v. 14, p. 150-163, 2004.

DAVIDSON, E.A.; ISHIDA, F.Y.; NEPSTAD, D.C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 5, p. 718-730, May. 2004.

DAWSON, T.E.; MAMBELLI, S.; PLAMBOECK, A.H.; TEMPLER, P.H.; TU, K.P. Stable isotopes in plant ecology. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 33, p. 507-559, 2002.

DEAN, W. **A ferro e fogo: A história e a devastação da Mata Atlântica**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 484p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400p.

EWEL, J. Tropical succession: manifold routes to maturity. **Biotropica**, Washington, v. 12, p. 2-7, 1980.

FERREIRA, S.J.F.; LUIZÃO, F.J.; MIRANDA, S.A.F.; da SILVA, M.S.R.; VITAL, A.R.T. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração de madeira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 58-68, 2006.

FIGUEIRA, A.M.E.S. **Mudanças no uso e cobertura do solo na Amazônia e suas implicações no ciclo do nitrogênio**. 2006. 114p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FONSECA, S. **Propriedades físicas, químicas e microbiológicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob eucalipto, mata natural e pastagens.** 1984. 78p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.; SILVA, E.M.R.; FARIA S.M. **Revegetação de solos degradados.** EMBRAPA, 1992. 8p. (Comunicado Técnico, 9).

FREITAS, N.P.; TAKAKI, M.; FIGUEIRA, J.A. Análise do efeito da luz na germinação de sementes de *Tibouchina pulchra* e *Tibouchina sellowiana* (Melastomataceae). In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 1998, Salvador. **Anais...** São Paulo :FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica 2011-2012:** relatório técnico, 2013. 61p.

GÓMEZ-POMPA, A.; VÁZQUEZ-YANES, C. Successional studies of a rain forest in México. In: WEST, D.C; SHUGART, H.H.; BOTKIN, D.B. (Ed.). **Forest Succession. Concepts and application.** New York:Springer-Verlag, 1981. p. 246-266.

GUIMARÃES, P.J.F. *Tibouchina* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB9965>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

HEDIN, L.O.; VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. Nutrient losses over four million years of tropical forest development. **Ecology**, Tempe, v. 84, p. 2231-2255, 2003.

HÖGBERG, P. ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. **New Phytologist**, Cambridge, v. 137, n. 2, p. 179-203, 1997.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENTA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

ISERNHAGEN, I.; BRANCALION, P.H.S.; RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Abandono da cópia de um modelo de floresta madura e foco na restauração dos processos ecológicos responsáveis pela reconstrução de uma floresta (fase atual). In: RODRIGUES, R.R.; BRANCALION, P.H.S. ISERNHAGEN, I. (Org.). **Pacto pela restauração da Mata Atlântica:** Referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BIOATLÂNTICA, 2009. 256p.

JOHNSON, C.M.; ULRICH, A. Analytical methods for use in plant analysis. **California Agricultural Experiment Station Bulletin**, Berkeley, v. 766, p. 1-78, 1959.

JORDAN, C.F.; HERRERA, R. Tropical rain forest: are nutrients really critical? **The American Naturalist**, New York, v.117, p.167-180, 1981.

KLEIN, R.M. Contribuição à identificação de árvores nativas nas florestas do sul do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 1982, Campos do Jordão. **Anais...** São Paulo: Instituto Florestal, 1982. p.421-440,

LEPSCH, I.F. **19 lições de pedologia**. Oficina de Textos, 2011. 456p.

LINS, S.R. **O papel das leguminosas na dinâmica de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Montana situadas no PESM, núcleos Picinguaba Santa Virgínia**. 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5 ed. Nova Odessa – SP: Instituto Plantarum, 2009. v.1, 384p.

LOTT, W.L.; NERY, J.P.; GALLO, J.R.; MEDCALF, J.C. Leaf analysis technique in coffee research. **IBCE Restoration Institute Bulletin**, Barcelona, v. 2, n. 9, p. 21-24, 1956.

MACEDO, M.O.; RESENDE, A.S.; GARCIA P.C.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S., CAMPELLO, E.F.C.; FRANCO A.A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 1516-1524. Doi: 10.1016/j.foreco. 2007.11.007. 2008.

MARDEGAN, S.F. **Abundância natural de 15N em solos e folhas de áreas de Campina e Campinarana da Reserva Biológica da Campina – INPA, região de Manaus, Amazonas**. 2007. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, Manaus, 2007.

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M.Z. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144p.

MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; TOWNSEND, A.R.; VITOUSEK, P.M.; CUEVAS, E.; McDOWELL, W.; ROBERTSON, G.P.; SANTOS, O.C.; TRESEDER, K. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: Tropical versus temperate forests. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 46, p. 45-65, 1999.

MARTINS, C.R; PEREIRA, P.A.; LOPES, W.A.; ANDRADE, J.B. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: A importância da Química da Atmosfera. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n.5, p.28-41, nov. 2003.

MARTINS, S.C. **Caracterização dos solos e serapilheira ao longo do gradiente altitudinal da Mata Atlântica, Estado de São Paulo**. 2010. 156p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, p. 853-858, 2000.

NARDOTO, G.B. **Abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ na Amazônia e Cerrado – implicações para a ciclagem do nitrogênio**. 2005. 101p. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NARDOTO, G.B.; OMETTO, J.P.H.B.; EHLERINGER, J.R.; HIGUCHI, N.; BUSTAMANTE, M.M.C.; MARTINELLI, L.A. Understanding the influences of spatial patterns on the N availability within the Brazilian Amazon Forest. **Ecosystems**, New York, v. 11, p. 1234-1246, 2008.

NOGUEIRA L.; GONÇALVES, J.L.M.; ENGEL, V.L.; PARROTTA J. Soil dynamics and carbon stocks 10 years after restoration of degraded land using Atlantic Forest tree species. **Forest Systems**, Madrid, v. 20, p. 536-545, 2011.

ODUM, E.P. The strategy of ecosystem development. **Science**, Washington, v. 164, p. 262-270, 1969.

ORTEGA, A.R.; ALMEIDA, L.S.; MAIA, N., ANGELO, A.C. Avaliação do crescimento de mudas de *Psidium cattleianum* Sabine a diferentes níveis de sombreamento em viveiro. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 300-308, 2006.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L. Vegetation dynamics. In: van der MAAREL, E. (Ed.). **Vegetation Ecology**. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. p. 172-198.

PICKETT, S.T.A.; PARKER, T.; FIEDLER, P.L. The new paradigm in Ecology: implications for conservation biology above the species level. In: FIEDLER, P. L.; JAINS, S.K. (Ed.). **Conservation Biology**. New York: Chapman & Hall, 1992. p. 65-88.

PLANO DE MANEJO PESM. 2006. Disponível em: <http://www.iflorestal.sp.gov.br/Plano_de_manejo/index.asp>. Acesso em: 24 jun.13.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; PONZONI, F.; MARTENSEN, A.C.; HIROTA, M. Brazilian Atlantic forest: how much is left and how the remaining forest is distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

RODRIGUES, R.R. A sucessão florestal. In: MORELLATO, L.P.C.; LEITÃO-FILHO, H.F. (Org.). **Ecologia e preservação de uma floresta tropical urbana**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. p. 30-35.

SANTOS, G.G.; SILVEIRA, P.M.; MARCHÃO, R.L.; BECQUER, T.; BALBINO, L.C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um latossolo vermelho do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 115-122, 2008.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balances hídricos climatológicos do Brasil - 500 balances hídricos de localidades brasileiras**. Piracicaba: ESALQ, 1999. 1 CD-ROM.

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 13, p. 699-756, 1986.

SIDDIQUE, I.; ENGEL, V.L.; PARROTA, J.A.; LAMB, D.; NARDOTO, G.B.; OMETTO, J.P.H.B.; MARTINELLI, L.A.; SCHIMIDT, S. Dominance of legume trees alters nutrient relations in mixed species forest restoration plantings within seven years. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 88, p. 89-101, Mar. 2008. doi: 10.1007/s10533-008-9196-5.

SOBRAL, M.; PROENÇA, C.; SOUZA, M.; MAZINE, F.; LUCAS, E. *Myrtaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB10858>>. Acesso em: 10 fev.2014.

TABARELLI, M.; MANTOVANI, W. A regeneração de uma floresta tropical Montana após corte e queima (São Paulo-Brasil). **Revista Brasileira de Biologia**, São Paulo, v. 59, n.2, p. 239-250, 1999a.

TABARELLI, M.; MANTOVANI, W. A riqueza de espécies arbóreas na Floresta Atlântica de encosta no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 217-223, 1999b.

TANNER, E.V.J.; VITOUSEK, P.M.; CUEVAS, E. Experimental investigation of nutrient limitation of forest growth on wet tropical mountains. **Ecology**, New York, v. 79, p. 10-22, 1998.

TOWNSEND, A.R.; ASNER, G.P. Multiple dimensions of resource limitation in tropical forests. **PNAS**, v. 110, p. 4864-4865, 2013. Disponível em: <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1301606110>. Acesso em: 21 jan.2014.

TOWNSEND, A.R.; CLEVELAND C.C.; ASNER G.P.; BUSTAMANTE, M.M.C. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. **Ecology**, Tempe, v. 88, p. 107-18, 2007.

TOWNSEND, A.R.; CLEVELAND, C.C.; HOULTON, B.Z.; ALDEN, C.B.; WHITE, J.W.C. Multi-element regulation of the tropical forest carbon cycle. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 9, n. 1, p. 9-17, 2011. DOI: 10.1890/100047.

VELOSO, H.P.; RANGEL-FILHO, A.L.R.; LIMA, I.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 123p.

VITOUSEK, P.M. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **American Naturalist**, Chicago, v. 119, p. 553-572, 1982.

VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystems: a field experiment. **Science**, Washington, v. 225, n. 4657, p. 51-52, July 1984.

VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A.; CLEVE, K.V. Nitrogen availability and nitrification during succession: primary, secondary, and old-field series. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 115, p. 229-239, 1989.

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**, Washington, v. 7, n. 3, p. 737-750, 1997.

VITOUSEK, P.M.; CASSMAN, K.; CLEVELAND, C.; CREWS, T.; FIELD, C.B.; GRIMM, N.B.; HOWARTH, R.W.; MARINHO, R.; MARTINELLI, L.A.; RASTETTER, E.B.; SPRENT, J.I. Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 57, p. 1-45, 2002.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, p.1-19, 1976.

ANEXOS

ANEXO A – Razão C:N e concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo

(continua)

Transecção	Parcela	C (g/Kg⁻¹)	N (g/Kg⁻¹)	C:N	P (mg.dm⁻³)
A - Puruba	1	28.2	2.1	13.7	11.0
A - Puruba	2	30.4	2.1	14.6	8.0
A - Puruba	3	29.7	2.1	14.0	10.0
A - Puruba	4	29.2	2.0	14.5	9.0
A - Puruba	5	30.2	2.1	14.5	10.0
A - Puruba	6	35.1	2.4	14.4	10.0
A - Puruba	7	39.5	2.8	13.9	11.0
A - Puruba	8	35.2	2.4	14.5	10.0
A - Puruba	9	33.6	2.3	14.9	10.0
A - Puruba	10	34.2	2.2	15.8	8.0
A - Puruba	11	38.1	2.5	15.4	9.0
A - Puruba	12	35.4	2.3	15.4	8.0
A - Puruba	13	39.6	2.4	16.3	8.0
A - Puruba	14	43.2	2.5	17.0	5.0
A - Puruba	15	32.0	1.9	17.9	7.0
A - Puruba	16	37.9	2.4	15.8	7.0
A - Puruba	17	44.4	2.8	15.7	9.0
A - Puruba	18	54.8	3.6	15.1	12.0
A - Puruba	19	41.3	2.6	15.5	9.0
A - Puruba	20	41.1	2.6	16.0	7.0
B - Puruba	1	29.7	1.9	15.3	8.0
B - Puruba	2	28.1	1.8	15.2	9.0
B - Puruba	3	31.4	2.1	15.3	12.0
B - Puruba	4	28.2	1.9	14.7	8.0
B - Puruba	5	35.3	2.3	15.4	12.0
B - Puruba	6	38.7	2.5	15.2	8.0
B - Puruba	7	35.2	2.4	14.9	8.0
B - Puruba	8	35.8	2.3	15.3	8.0
B - Puruba	9	36.5	2.4	15.1	9.0
B - Puruba	10	37.2	2.4	15.6	8.0
B - Puruba	11	37.6	2.3	16.0	7.0
B - Puruba	12	36.3	2.3	15.5	8.0
B - Puruba	13	38.8	2.4	16.1	7.0
B - Puruba	14	38.1	2.4	16.1	7.0
B - Puruba	15	38.3	2.3	16.8	8.0

ANEXO A – Razão C:N e concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo
(conclusão)

Transecção	Parcela	C (g/Kg⁻¹)	N (g/Kg⁻¹)	C:N	P (mg.dm⁻³)
B - Puruba	16	40.8	2.5	16.3	7.0
B - Puruba	17	35.8	2.3	15.8	6.0
B - Puruba	18	41.7	2.7	15.5	9.0
B - Puruba	19	46.2	3.2	14.6	11.0
B - Puruba	20	38.0	2.8	13.5	10.0
A - Pirapitinga	1	31.1	2.3	13.2	16.0
A - Pirapitinga	2	22.8	1.8	12.9	13.0
A - Pirapitinga	3	25.0	1.9	13.4	13.0
A - Pirapitinga	4	21.3	1.6	13.5	10.0
A - Pirapitinga	5	27.4	1.9	14.2	10.0
A - Pirapitinga	6	43.3	3.4	12.9	22.0
A - Pirapitinga	7	33.6	2.7	12.6	15.0
A - Pirapitinga	8	36.5	2.8	12.8	15.0
A - Pirapitinga	9	35.7	2.7	13.5	10.0
A - Pirapitinga	10	33.1	2.5	13.0	13.0
A - Pirapitinga	11	28.4	2.5	11.4	12.0
A - Pirapitinga	12	26.2	2.3	11.2	12.0
A - Pirapitinga	13	36.1	3.0	12.1	16.0
A - Pirapitinga	14	32.0	2.7	12.0	15.0
A - Pirapitinga	15	39.3	3.4	11.4	17.0
B - Pirapitinga	1	33.3	2.4	14.0	18.0
B - Pirapitinga	2	32.5	2.1	15.3	17.0
B - Pirapitinga	3	29.2	2.1	14.2	20.0
B - Pirapitinga	4	39.0	2.4	16.5	14.0
B - Pirapitinga	5	34.0	2.3	15.1	23.0
B - Pirapitinga	6	37.6	3.1	12.3	16.0
B - Pirapitinga	7	37.8	3.0	12.4	23.0
B - Pirapitinga	8	41.5	3.3	12.4	14.0
B - Pirapitinga	9	35.6	2.8	12.6	17.0
B - Pirapitinga	10	33.9	2.5	13.3	14.0
B - Pirapitinga	11	34.4	3.0	11.6	17.0
B - Pirapitinga	12	32.3	2.9	11.0	16.0
B - Pirapitinga	13	33.8	3.0	11.3	19.0
B - Pirapitinga	14	41.9	3.5	11.8	21.0
B - Pirapitinga	15	31.7	2.8	11.5	16.0

ANEXO B – Composição isotópica do nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) e do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo

(continua)

Transecção	Parcela	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$
A - Puruba	1	6.0	-19.7
A - Puruba	2	6.3	-21.0
A - Puruba	3	6.0	-23.1
A - Puruba	4	6.4	-24.1
A - Puruba	5	6.2	-25.3
A - Puruba	6	6.2	-24.7
A - Puruba	7	6.2	-22.3
A - Puruba	8	6.4	-24.3
A - Puruba	9	6.7	-25.1
A - Puruba	10	6.8	-25.4
A - Puruba	11	6.3	-25.5
A - Puruba	12	6.5	-25.0
A - Puruba	13	6.6	-25.4
A - Puruba	14	6.4	-25.8
A - Puruba	15	5.9	-25.7
A - Puruba	16	6.2	-26.3
A - Puruba	17	5.7	-27.0
A - Puruba	18	4.9	-27.3
A - Puruba	19	5.4	-27.1
A - Puruba	20	5.3	-27.5
B - Puruba	1	6.4	-20.5
B - Puruba	2	6.3	-20.0
B - Puruba	3	6.7	-20.4
B - Puruba	4	7.2	-22.1
B - Puruba	5	6.4	-24.1
B - Puruba	6	6.6	-24.8
B - Puruba	7	7.0	-24.5
B - Puruba	8	6.9	-24.0
B - Puruba	9	6.8	-24.5
B - Puruba	10	6.6	-24.7
B - Puruba	11	6.5	-25.0
B - Puruba	12	6.3	-25.1
B - Puruba	13	6.7	-24.5
B - Puruba	14	6.6	-25.1
B - Puruba	15	6.7	-25.9

ANEXO B – Composição isotópica do nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) e do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo
(conclusão)

Transecção	Parcela	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$
B - Puruba	16	6.0	-26.9
B - Puruba	17	6.7	-26.5
B - Puruba	18	6.2	-27.4
B - Puruba	19	6.5	-27.7
B - Puruba	20	6.8	-27.6
A - Pirapitinga	1	6.3	-25.7
A - Pirapitinga	2	6.7	-24.5
A - Pirapitinga	3	6.1	-22.8
A - Pirapitinga	4	6.0	-23.2
A - Pirapitinga	5	6.2	-24.2
A - Pirapitinga	6	5.4	-26.6
A - Pirapitinga	7	6.0	-27.1
A - Pirapitinga	8	6.3	-27.0
A - Pirapitinga	9	6.5	-27.0
A - Pirapitinga	10	6.7	-26.2
A - Pirapitinga	11	5.8	-27.6
A - Pirapitinga	12	6.0	-27.5
A - Pirapitinga	13	5.6	-27.8
A - Pirapitinga	14	5.7	-27.6
A - Pirapitinga	15	5.9	-27.9
B - Pirapitinga	1	6.3	-25.9
B - Pirapitinga	2	5.4	-26.1
B - Pirapitinga	3	6.0	-25.0
B - Pirapitinga	4	5.5	-25.6
B - Pirapitinga	5	5.8	-24.4
B - Pirapitinga	6	6.6	-26.9
B - Pirapitinga	7	6.4	-26.8
B - Pirapitinga	8	6.6	-27.1
B - Pirapitinga	9	6.3	-27.3
B - Pirapitinga	10	6.6	-26.8
B - Pirapitinga	11	5.8	-27.7
B - Pirapitinga	12	6.0	-27.4
B - Pirapitinga	13	5.7	-27.7
B - Pirapitinga	14	6.4	-27.8
B - Pirapitinga	15	6.3	-27.7

ANEXO C – Razões C:N e N:P e concentrações de nitrogênio, carbono, fósforo nas folhas em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo

(continua)

Transecção	Parcela	N (g. kg⁻¹)	C (g. kg⁻¹)	C:N	P (g. kg⁻¹)	N:P
A - Puruba	1	27.9	458.5	16.8	1.9	14.8
A - Puruba	2	23.0	441.3	21.5	2.2	10.3
A - Puruba	3	22.4	459.8	22.1	1.1	20.5
A - Puruba	4	20.0	474.8	24.6	1.0	20.0
A - Puruba	5	19.3	470.8	26.4	1.1	18.2
A - Puruba	6	24.0	458.4	21.4	1.6	14.7
A - Puruba	7	29.3	466.5	18.0	1.7	17.7
A - Puruba	8	20.7	439.7	22.0	0.9	23.7
A - Puruba	9	21.5	446.1	22.2	0.6	35.2
A - Puruba	10	16.9	435.5	25.9	0.6	27.8
A - Puruba	11	17.8	454.5	26.0	0.7	25.5
A - Puruba	12	18.2	459.1	26.2	0.6	28.5
A - Puruba	13	15.4	433.3	28.7	0.6	26.1
A - Puruba	14	16.2	416.1	26.3	0.6	28.9
A - Puruba	15	16.6	417.0	25.6	0.5	33.9
A - Puruba	16	18.5	446.1	24.7	0.6	29.8
A - Puruba	17	18.6	440.5	24.3	0.7	26.6
A - Puruba	18	33.6	463.9	16.7	1.0	32.6
A - Puruba	19	42.9	444.9	11.0	0.7	60.4
A - Puruba	20	27.5	463.6	22.9	0.5	50.9
B - Puruba	1	28.3	474.6	17.6	1.9	14.7
B - Puruba	2	23.0	461.0	20.7	1.7	14.0
B - Puruba	3	29.3	460.3	15.9	2.1	14.2
B - Puruba	4	27.0	462.1	17.3	1.7	16.1
B - Puruba	5	22.1	453.9	24.8	1.3	16.5
B - Puruba	6	22.1	470.1	24.4	1.3	16.8
B - Puruba	7	16.5	433.5	30.1	0.7	24.2
B - Puruba	8	19.5	446.6	24.7	0.8	24.4
B - Puruba	9	15.7	424.9	27.3	0.7	22.7
B - Puruba	10	15.4	420.5	27.3	0.7	21.7
B - Puruba	11	18.4	440.9	24.2	0.7	27.0
B - Puruba	12	14.5	418.9	29.3	0.6	24.1
B - Puruba	13	16.7	428.2	25.8	0.6	26.9
B - Puruba	14	15.5	422.4	27.4	0.6	25.4
B - Puruba	15	15.2	429.9	28.5	0.6	26.7

ANEXO C – Razões C:N e N:P e concentrações de nitrogênio, carbono, fósforo nas folhas em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo

(conclusão)

Transecção	Parcela	N (g. kg⁻¹)	C (g. kg⁻¹)	C:N	P (g. kg⁻¹)	N:P
B - Puruba	16	17.5	443.8	25.5	0.5	34.4
B - Puruba	17	19.6	428.7	22.0	0.7	29.3
B - Puruba	18	23.2	459.6	20.7	0.7	31.8
B - Puruba	19	22.8	423.2	19.2	0.7	34.1
B - Puruba	20	27.9	438.4	16.9	0.9	30.0
A - Pirapitinga	1	19.0	461.2	33.8	1.9	9.8
A - Pirapitinga	2	17.2	446.8	29.4	0.9	19.1
A - Pirapitinga	3	15.3	455.3	33.2	1.1	13.6
A - Pirapitinga	4	12.8	438.3	37.2	0.5	27.9
A - Pirapitinga	5	20.8	458.4	28.4	1.4	14.4
A - Pirapitinga	6	18.4	456.3	26.6	0.8	24.0
A - Pirapitinga	7	21.2	470.1	23.8	0.8	25.6
A - Pirapitinga	8	27.6	450.9	19.7	1.0	28.5
A - Pirapitinga	9	23.2	446.6	21.6	1.3	18.2
A - Pirapitinga	10	19.0	449.7	27.3	1.5	12.4
A - Pirapitinga	11	25.1	442.4	18.4	0.9	27.3
A - Pirapitinga	12	28.2	445.6	17.8	1.0	27.4
A - Pirapitinga	13	30.3	449.7	15.4	0.9	33.7
A - Pirapitinga	14	23.5	455.6	21.7	1.5	15.3
A - Pirapitinga	15	25.7	451.7	18.4	1.0	24.9
B - Pirapitinga	1	14.7	458.4	32.5	0.8	17.9
B - Pirapitinga	2	14.9	469.4	37.7	0.9	16.6
B - Pirapitinga	3	17.1	469.4	33.5	0.8	20.8
B - Pirapitinga	4	14.9	493.4	36.1	0.7	20.4
B - Pirapitinga	5	18.5	463.0	27.8	1.6	11.5
B - Pirapitinga	6	23.1	457.7	20.6	1.1	21.6
B - Pirapitinga	7	26.8	449.3	17.8	1.1	23.7
B - Pirapitinga	8	24.3	447.6	19.5	0.8	32.0
B - Pirapitinga	9	29.2	453.9	16.2	1.2	25.0
B - Pirapitinga	10	19.2	469.9	29.9	1.2	16.3
B - Pirapitinga	11	28.4	449.1	17.2	1.1	25.1
B - Pirapitinga	12	21.8	437.5	21.4	1.1	20.2
B - Pirapitinga	13	25.1	460.3	19.8	1.1	22.2
B - Pirapitinga	14	33.3	454.6	14.1	1.7	19.8
B - Pirapitinga	15	27.5	460.6	17.8	1.6	17.5

ANEXO D – Composição isotópica do nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) e do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo

(continua)

Transecção	Parcela	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
A - Puruba	1	2.0	-30.7
A - Puruba	2	2.7	-30.4
A - Puruba	3	1.7	-30.5
A - Puruba	4	2.2	-30.3
A - Puruba	5	1.8	-30.3
A - Puruba	6	2.9	-29.5
A - Puruba	7	3.3	-29.9
A - Puruba	8	3.2	-29.9
A - Puruba	9	3.0	-30.2
A - Puruba	10	2.9	-29.3
A - Puruba	11	2.4	-29.5
A - Puruba	12	1.9	-29.5
A - Puruba	13	2.1	-28.7
A - Puruba	14	1.6	-29.6
A - Puruba	15	1.6	-29.6
A - Puruba	16	2.1	-30.4
A - Puruba	17	2.2	-29.7
A - Puruba	18	2.4	-30.9
A - Puruba	19	2.7	-32.2
A - Puruba	20	-0.5	-32.7
B - Puruba	1	1.7	-29.7
B - Puruba	2	0.3	-30.7
B - Puruba	3	1.8	-29.8
B - Puruba	4	2.5	-29.8
B - Puruba	5	2.5	-30.1
B - Puruba	6	2.3	-30.8
B - Puruba	7	3.1	-30.7
B - Puruba	8	2.5	-30.8
B - Puruba	9	3.1	-29.1
B - Puruba	10	2.4	-28.8
B - Puruba	11	2.7	-29.8
B - Puruba	12	2.3	-28.9
B - Puruba	13	2.1	-28.6
B - Puruba	14	2.1	-29.6
B - Puruba	15	1.8	-29.5

ANEXO D – Composição isotópica do nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) e do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) nas amostras de solo coletadas entre 0 e 10 cm de profundidade em cada uma das parcelas estabelecidas nas transecções denominadas Puruba e Pirapitinga no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo
(conclusão)

Transecção	Parcela	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
B - Puruba	16	2.5	-29.1
B - Puruba	17	3.5	-29.6
B - Puruba	18	3.2	-32.3
B - Puruba	19	3.1	-33.2
B - Puruba	20	3.1	-31.8
A - Pirapitinga	1	0.2	-30.2
A - Pirapitinga	2	0.9	-30.5
A - Pirapitinga	3	1.4	-29.3
A - Pirapitinga	4	1.2	-30.0
A - Pirapitinga	5	2.1	-30.4
A - Pirapitinga	6	-0.2	-31.1
A - Pirapitinga	7	1.7	-31.7
A - Pirapitinga	8	1.7	-31.9
A - Pirapitinga	9	0.4	-30.4
A - Pirapitinga	10	0.1	-30.2
A - Pirapitinga	11	3.4	-33.7
A - Pirapitinga	12	3.0	-32.3
A - Pirapitinga	13	2.5	-33.3
A - Pirapitinga	14	2.6	-33.5
A - Pirapitinga	15	2.1	-33.6
B - Pirapitinga	1	0.5	-30.5
B - Pirapitinga	2	-0.2	-29.5
B - Pirapitinga	3	1.8	-29.6
B - Pirapitinga	4	-1.0	-29.2
B - Pirapitinga	5	1.3	-29.1
B - Pirapitinga	6	1.9	-31.9
B - Pirapitinga	7	2.9	-31.8
B - Pirapitinga	8	1.5	-30.9
B - Pirapitinga	9	2.8	-32.1
B - Pirapitinga	10	-0.9	-30.8
B - Pirapitinga	11	2.3	-33.1
B - Pirapitinga	12	1.2	-33.3
B - Pirapitinga	13	0.9	-33.9
B - Pirapitinga	14	2.5	-32.9
B - Pirapitinga	15	2.1	-32.4