

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES
EM UMA PLANTAÇÃO DE *Pinus taeda* L. NO
NORDESTE ARGENTINO**

TESE DE DOUTORADO

Silvana Lucia Caldato

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES EM UMA
PLANTAÇÃO DE *Pinus taeda* L. NO NORDESTE ARGENTINO**

Silvana Lucia Caldato

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES EM UMA
PLANTAÇÃO DE *Pinus taeda* L. NO NORDESTE ARGENTINO**

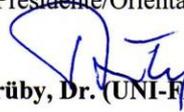
elaborada por
Silvana Lucia Caldato

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:



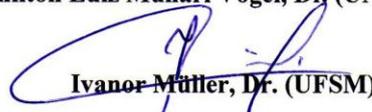
Mauro Valdir Schumacher, Dr. nat. techn.
(Presidente/Orientador)



Peter Trüby, Dr. (UNI-FREIBURG)



Hamilton Luiz Munari Vogel, Dr. (UNIPAMPA)



Ivanor Müller, Dr. (UFSM)



Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 18 de março de 2011.

*A ciência tem a fascinação da aventura,
porque acima de tudo é uma exploração ao desconhecido.*

César Milstein, Prêmio Nobel de Medicina.

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Lucio e Giuliano,
Ao meu esposo Raúl,
e aos meus pais Sadir e Jandira,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher, pela orientação e confiança.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo concedida parcialmente durante o curso de doutorado.

À Empresa Forestal Bosques del Plata S.A., pelo financiamento do projeto e disponibilização da área experimental.

Ao Prof. Dr. Peter Trüby, pela disponibilidade da tecnologia utilizada.

Ao Prof. Dr. Solon Jonas Longhi, pelo apoio.

Ao Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, pelas sugestões realizadas.

Ao meu esposo Raúl Pezzutti, pela ajuda incansável na realização do curso de doutorado.

Ao Eng^o. Ftal. M.Sc. Vicente Guilherme Lopes e ao acadêmico de Engenharia Florestal Edenilson Liberalesso, pela colaboração na instalação do experimento.

Aos Eng^o. Agrônomos Cesar Niklas e Sebastián Boilini e ao técnico Carlos Giménez, pela ajuda na coleta de dados.

Ao Eng^o. Ftal. Arturo Hernández Pugin, pelo apoio logístico.

Ao Eng^o. Ftal. M.Sc. Rudi Witschoreck, responsável pelas análises do Laboratório de Ecologia Florestal.

Aos professores e colegas do curso de doutorado em Engenharia Florestal e Agronomia da UFSM.

A todos os familiares e amigos, pela força.

Muito obrigada!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

CICLAGEM BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES EM UMA PLANTAÇÃO DE *Pinus taeda* L. NO NORDESTE ARGENTINO

Autora: Silvana Lucia Caldato
Orientador: Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 18 de março de 2011.

O objetivo deste estudo foi caracterizar fluxos hídricos e nutricionais em uma plantação de *Pinus taeda* com 12 anos de idade, localizada no Nordeste da Argentina. As deposições atmosféricas e a distribuição da precipitação global em precipitação interna, escoamento pelo tronco e perdas por interceptação do dossel, bem como a composição química da solução do solo na plantação de pinus e em área de campo, foram avaliadas durante o período de um ano. Três pluviômetros foram instalados na área de campo para medir e coletar a precipitação global. Para medir a precipitação interna, 12 pluviômetros foram instalados no interior da plantação e 12 coletores foram utilizados (em árvores selecionadas) para determinar o escoamento pelo tronco. Para estudar a composição química da solução do solo, foram instaladas duas bases de lisímetros de tensão: uma na plantação de *Pinus taeda* e outra em área de campo. Para coletar a solução do solo nas profundidades de 30 e 70 cm, 16 lisímetros foram posicionados em cada área. A biomassa foi quantificada e o estoque de nutrientes foi estimado em diferentes componentes das árvores, assim como a serapilheira acumulada sobre o solo, e o solo a 1 m de profundidade. A precipitação anual foi de 2228 mm, sendo que a interceptação pelo dossel do pinus foi de 26,5%, e a precipitação efetiva foi de 73,5%, da qual 68,9% foram da precipitação interna e 4,6% do escoamento pelo tronco. Os principais íons que entraram pela precipitação foram os ânions N-NO_3^- , SO_4^{2-} e N-NO_2^- e os cátions Na^+ e Ca^{2+} . A passagem da água da chuva pelas copas e troncos ocasionou a adição de vários elementos, principalmente de potássio e de magnésio. A solução do solo sob plantação de pinus apresentou uma elevada concentração de íons, principalmente de cátions básicos (trocaíveis) em sua composição quando comparada com a área de campo, indicando a importância da ciclagem de nutrientes no ecossistema florestal. O maior estoque de nutrientes no povoamento se encontra na biomassa não comercial (acículas, galhos, raízes e serapilheira), mostrando que dependendo das práticas adotadas de manejo, a saída de nutrientes pode ser menor do que o estoque que permanece no sítio depois da colheita florestal.

Palavras-chave: *Pinus taeda*; fluxos hídricos e nutricionais; solução do solo; biomassa.

ABSTRACT

Doctor's Thesis
Post-Graduation Program in Forest Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil

NUTRIENT BIOGEOCHEMICAL CYCLING IN A *Pinus taeda* L. PLANTATION IN NORTHEAST OF ARGENTINA

Author: Silvana Lucia Caldato
Adviser: Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher
Date and Place of the Defense: Santa Maria, March 18th, 2011.

The objectives of this study were to characterize water and nutrient fluxes in a *Pinus taeda* plantation at 12 year-old located in the northeast of Argentina. The atmospheric deposition and rainfall partitioning into throughfall, stemflow and canopy interception loss and the chemical composition of soil solution in the pinus plantation and in a grassland area was evaluated during a year. Three rain collectors were installed in the grassland area to measure and collect the rainfall (bulk precipitation), twelve rain collectors were installed in the interior of the plantation to measure the throughfall and twelve stemflow collectors (in selected trees) were used to determine the stemflow. To study the chemical composition of the soil solution two sets of tension lysimeters were installed: one in a *Pinus taeda* plantation and another one in the open area. To collect soil solutions at the depths of 30 and 70 cm sixteen lysimeters were placed in each area. The biomass was quantified and the stock of nutrients in the tree component was estimated, as well as the accumulated litter on the floor and the soil at 1 m of depth. The annual rainfall was 2228 mm, the pine canopy intercepted on average 26,5% and the net precipitation was 73,5%, of which, 68,9 % was by throughfall and 4,6% by stemflow. The anions N-NO_3^- , SO_4^{2-} and N-NO_2^- and the cations Na^+ and Ca^{2+} were the main chemical inputs from bulk precipitation. The transfer of fluxes through the canopy and stems of pine caused an enrichment for most elements mainly potassium and magnesium. The solution of the soil under pine plantation showed a high concentration of ions, mainly base cations (exchangeable), in its composition compared with the grassland area, indicating the importance of nutrient cycling in forest ecosystem. The main budget of nutrients in the pine stand is a non-commercial biomass (needles, branches, roots and litter), showing that depending on the adopted management practices, the output of nutrients may be less than the budget that remains in the site after the forest harvesting.

Key-words: *Pinus taeda*; water and nutritional fluxes; soil solution; biomass.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fluxo de nutrientes na precipitação global (PG) em lugar aberto, precipitação interna (PI) no interior da floresta, escoamento pelo tronco (ETr) e deposição seca (DS) na floresta, em diferentes lugares e tipos vegetação.....	27
Tabela 2 - Características químicas e físicas do solo da região.....	33
Tabela 3 - Crescimento em diâmetro (DAP), altura (h), área basal (G) e volume (V) e seus respectivos incrementos médio anual (IMA) e periódico anual (IPA) de <i>Pinus taeda</i> em função da idade.....	36
Tabela 4 - Coeficientes e qualidade do ajuste do modelo selecionado para árvores de <i>Pinus taeda</i> para os diferentes componentes.....	48
Tabela 5 - Valores mensais e anual da precipitação global (PG), escoamento pelo tronco (ETr), precipitação interna (PI) e interceptação (I), observados no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área do estudo.....	51
Tabela 6 - Valores médios de pH observados nos diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.....	53
Tabela 7 - Condutividade elétrica média nos diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.....	55
Tabela 8 - Concentração dos íons analisados em diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.....	57
Tabela 9 - Coeficiente de correlação de Pearson entre os elementos nos diferentes fluxos.....	62
Tabela 10 - Coeficiente de correlação de Pearson entre o volume de precipitação global (mm) e a concentração dos elementos (mg l^{-1}) nos diferentes fluxos.....	63
Tabela 11 - Concentração média em $\mu\text{mol l}^{-1}$ da soma de cátions básicos nos diferentes fluxos, período e sítios estudados.....	64
Tabela 12 - Fluxo médio anual de nutrientes estimado para a precipitação total, precipitação interna e no escoamento pelo tronco na área estudada.....	65
Tabela 13 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos para as variáveis dendrométricas e de biomassa seca individual (kg por	

árvore), obtidas em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	67
Tabela 14 - Biomassa por hectare estimada para os diferentes componentes das árvores e serapilheira em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	68
Tabela 15 - Média e coeficiente de variação da concentração de elementos nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	70
Tabela 16 - Estoque de elementos nos diferentes compartimentos da biomassa de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	72
Tabela 17 - Propriedades físicas e químicas do solo em diferentes profundidades, em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	75
Tabela 18 - Estoque de carbono e nutrientes disponíveis em diferentes profundidades do solo, em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	76
Tabela 19 - Teores de nutrientes na serapilheira produzida no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.....	80
Tabela 20 - Quantidade (kg ha^{-1}) de nutrientes acumulados mensalmente na serapilheira produzida em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, na área estudada.....	81
Tabela 21 - Balanço biogeoquímico dos macronutrientes e a estimativa do número de rotações (NR) para um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da cidade de Gobernador Virasoro, Corrientes, Argentina. Adaptado de Wikipédia (2010).....	31
Figura 2 - Vista da área experimental- os quadros em verde indicam a posição do estudo no povoamento de <i>Pinus taeda</i> e na área de campo, e o retângulo em vermelho a localização da estação meteorológica. Gob. Virasoro, Corrientes, Argentina. Fonte: Google Earth (2009).	32
Figura 3 - Número de árvores por classe de diâmetro em povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 12 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	35
Figura 4 - Aspecto dos coletores de água da chuva instalados no campo.....	38
Figura 5 - Aspecto dos coletores da precipitação interna, vistos de uma repetição nas 4 posições, instalados no plantio de <i>Pinus taeda</i>	38
Figura 6 - Sistema coletor de água do escoamento pelo tronco.....	40
Figura 7 - Instalação dos lisímetros na área de campo, detalhe do lisímetro com ponta de cerâmica.	41
Figura 8 - Detalhe da caixa contendo microbombas de vácuo (A), <i>timmer</i> (B), bateria (C) e as garrafas (D) coletoras da solução do solo.....	42
Figura 9 - Vista geral do experimento na plantação de <i>Pinus taeda</i> e na área de campo.....	42
Figura 10 - Aspectos da metodologia empregada na amostragem de biomassa.....	46
Figura 11 - Precipitação global (PG) e temperatura média (T°) observadas na área do estudo, no período de agosto de 2009 a julho de 2010, e médias históricas (1993-2010), Gob. Virasoro, Argentina.....	50
Figura 12 - Variação mensal do pH por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.....	54
Figura 13 - Variação mensal da concentração de condutividade elétrica por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco;	

SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.....	56
Figura 14 - Variação mensal da concentração de N nas formas de NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.....	59
Figura 15 - Variação mensal da concentração dos cátions (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+) por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof..	60
Figura 16 - Variação mensal da concentração dos ânions (P-PO_4^- , SO_4^{2-} e Cl^-) por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.....	61
Figura 17- Distribuição relativa dos nutrientes nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	74
Figura 18 - Serapilheira produzida em diferentes idades no povoamento de <i>Pinus taeda</i> , Corrientes, Argentina.....	77
Figura 19 – Sazonalidade da serapilheira produzida, produção mensal média de 10 anos e precipitação média mensal (pp) para o período de (2001-2010) em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> , Corrientes, Argentina.....	79
Figura 20 - Distribuição relativa dos nutrientes em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.....	82

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Resíduos versus biomassa estimada dos diferentes compartimentos de <i>Pinus taeda</i>	100
Apêndice B – Análise da variância – Procedimento GLM (General Linear Model).....	101
Apêndice C – Sazonalidade da serapilheira produzida em diferentes idades, produção média e precipitação média mensal (pp) em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> , Corrientes, Argentina.....	105
Apêndice D – Distribuição mensal de nutrientes (macronutrientes em g kg ⁻¹ , e micronutrientes em mg kg ⁻¹) na serapilheira produzida em um povoamento de <i>Pinus taeda</i> , Corrientes, Argentina.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- I** - interceptação (mm);
- PG** - precipitação global (mm);
- PI** - precipitação interna (mm);
- ETr** - escoamento pelo tronco (mm);
- PE** - precipitação efetiva = (PI + ETr).
- DS** - deposição seca;
- SS pinus 30 cm** - solução do solo no povoamento de pinus a 30 cm de profundidade;
- SS pinus 70 cm** - solução do solo no povoamento pinus a 70 cm de profundidade;
- SS campo 30 cm** - solução do solo na área de campo a 30 cm de profundidade;
- SS campo 70 cm** - solução do solo na área de campo a 70 cm de profundidade;
- DAP** - diâmetro a altura do peito (cm);
- h** – altura (m);
- G** - área basal (m²);
- V** – volume (m³ ha⁻¹);
- IMA** – incremento médio anual;
- IPA** – incremento periódico anual;
- CV** – coeficiente de variação (%);
- N** – nitrogênio;
- N-NH₄⁺** – nitrogênio na forma de amônio;
- N-NO₂⁻** – nitrogênio na forma de nitrito;
- N-NO₃⁻** – nitrogênio na forma de nitrato;
- PO₄⁻** – fosfato;
- SO₄²⁻** – sulfato;
- C** – carbono;
- P** – fósforo;
- K** – potássio;
- Ca** – cálcio;
- Mg** – magnésio;

S – enxofre;

Na – sódio;

Cl – cloro;

B – boro;

Cu – cobre;

Fe – ferro;

Mn – manganês;

Zn – zinco;

NR – número de rotações.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 <i>Pinus taeda</i> e as plantações florestais	21
2.2 Fluxos hídricos	22
2.3 Fluxos de nutrientes	24
2.4 Solução do solo	29
3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL	31
3.1 Localização	31
3.2 Vegetação	32
3.3 Clima	32
3.4 Solo	33
3.5 Histórico da área de estudo	34
3.6 Crescimento de <i>Pinus taeda</i> na área do estudo.....	34
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.1 Fluxos hídricos e nutricionais em plantação de <i>Pinus taeda</i> e em área de campo	37
4.1.1 Precipitação global (PG)	37
4.1.2 Precipitação interna (PI)	38
4.1.3 Escorrimento pelo tronco (ETr)	39
4.1.4 Interceptação	40
4.1.5 Solução do solo	40
4.1.6 Coleta de dados	43
4.1.7 Análises químicas	43
4.1.8 Análise estatística	43
4.2 Biomassa e nutrientes em plantação de <i>Pinus taeda</i>	44
4.2.1 Quantificação do estoque de nutrientes na biomassa	44
4.2.2 Estimativa do estoque de nutrientes disponíveis no solo	46
4.2.3 Estimativa de biomassa	47
4.2.4 Produção de serapilheira	48
4.2.5 Cenários de exportação e manutenção de nutrientes no sítio.....	49

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Fluxos hídricos e nutricionais em plantação de <i>Pinus taeda</i> e em área de campo	50
5.1.1 Precipitação	50
5.1.2 Valor de pH	52
5.1.3 Condutividade elétrica	54
5.1.4 Aporte de íons	56
5.2 Biomassa e nutrientes em plantação de <i>Pinus taeda</i>	67
5.2.1 Produção de biomassa	67
5.2.2 Elementos na biomassa	69
5.2.3 Elementos no solo	74
5.2.4 Serapilheira produzida e nutrientes	77
5.2.5 Exportação de nutrientes em função da intensidade de colheita.....	81
6 CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICES	100

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a FAO (2007), o mundo tem um pouco menos de 4 bilhões de hectares de florestas, cobrindo cerca de 30% da superfície terrestre. As plantações florestais alcançam 140 milhões de hectares, as quais representam 3,5% do total das áreas de florestas, e sua contribuição à produção global de madeira é de, aproximadamente, 50% do total.

Apesar da alta produtividade em relação à pequena escala de uso do solo, as florestas plantadas são alvo de intensas críticas e controvérsias geradas em torno dos impactos ambientais produzidos, devido, principalmente, ao aumento da superfície plantada e à diminuição dos recursos e biodiversidade global. Esse cenário tem aumentado o interesse e o número de pesquisas voltadas ao efeito das plantações florestais no ambiente, especialmente os relacionados ao uso de água e à manutenção da capacidade produtiva.

Os resultados das pesquisas têm mostrado que a relação entre as plantações florestais e a água depende da região, espécie, condições ambientais e práticas do uso do solo na escala da microbacia hidrográfica (ALMEIDA e SOARES, 2003; ANDREASSIAN, 2004; BROWN et al., 2005; VAN DIJK e KEENAN, 2007). Segundo Calder et al. (2007), apesar dos significativos progressos na compreensão científica das interações entre as florestas e a água, a função desempenhada pelos plantios florestais em relação ao manejo sustentável dos recursos hídricos continua sendo um assunto não resolvido. Persistem as dificuldades ao tentar transferir os resultados das pesquisas a diferentes países e regiões, bacias hidrográficas com diferentes dimensões, tipo de florestas, espécies e regimes diferenciados de manejo florestal.

Por outro lado, a expansão das superfícies plantadas com espécies de rápido crescimento, alta produtividade e em rotações curtas, trazem à discussão a perpetuidade da capacidade produtiva desse sistema. A produtividade das florestas está limitada principalmente pelo suprimento de nutrientes e de água (STAPE, BINKLEY e JACOB, 2006), sendo sua manutenção um dos pilares da sustentabilidade (LIMA, 2006).

O balanço hídrico definido como a diferença entre a entrada de água pela precipitação e a saída pela evapotranspiração é indicador-chave para avaliar o equilíbrio hidrológico da microbacia (CÂMARA, LIMA e ZAKIA, 2006).

A ciclagem de nutrientes nas florestas está intimamente ligada ao ciclo hidrológico, devido ao fato de a precipitação atuar como o principal agente de transporte e solvente (BRUIJNZEEL, 1989 apud BHAT, JACOBS e BRYANT, 2010). De acordo com Parker (1983), a precipitação interna e o escoamento pelo tronco são os fluxos principais da reciclagem dos nutrientes. Outro fluxo importante de nutrientes é o da solução do solo, pois a composição química dessa solução mostra mais rapidamente os efeitos do uso do solo que a fase sólida deste, além de ser também a forma principal como os nutrientes são absorvidos pelas plantas.

A biomassa das florestas é um tema relevante a nível global, principalmente no que se refere à ciclagem de nutrientes, especialmente com o ciclo do carbono, sua relação com o efeito estufa e o sequestro de carbono, pois, em média, esse elemento representa 50% da biomassa (BROWN, 1997).

A ecologia da produção de florestas pode ser avaliada em termos da disponibilidade de recursos, da taxa de uso e crescimento das mesmas (STAPE, BINKLEY e RYAN, 2008), além da eficiência com que as árvores utilizam esses recursos para fixar o dióxido de carbono (BATTAGLIA et al., 1998; GIARDINA, RYAN e BINKLEY, 2003; BINKLEY, STAPE e RYAN, 2004). Para Dewar e McMurtrie (1996), em plantações florestais, o balanço entre a entrada e a saída de nutrientes em sucessivas rotações é a maior limitante ecológica na sustentabilidade da produtividade do sítio. Uma quantidade significativa de nutrientes é liberada na decomposição dos resíduos e o novo plantio pode utilizar esses nutrientes (TIARKS e RANGER, 2008).

Apesar de a maioria dos plantios florestais estarem localizados em áreas marginais, pode-se lograr altas taxas de produtividade com a aplicação de uma silvicultura intensiva, com a otimização e o uso eficiente dos recursos disponíveis. Nesse sentido, é fundamental o conhecimento dos fatores que afetam a produtividade e a ciclagem de nutrientes em sucessivas rotações, pois o uso dos recursos e a manutenção da capacidade produtiva dependem das condições ambientais, da espécie utilizada e, principalmente, das práticas de manejo adotadas.

Portanto, estudos de produção de biomassa e ciclagem de nutrientes são ferramentas importantes que auxiliam nas decisões sobre o manejo dos recursos florestais, a fim de manter a capacidade produtiva do sítio, e conseqüentemente, a sustentabilidade do mesmo.

Nesse contexto, o objetivo geral do presente trabalho foi caracterizar os fluxos hídricos e nutricionais em uma plantação de *Pinus taeda* e sua relação com a sustentabilidade do ecossistema.

Os objetivos específicos foram:

- analisar a distribuição da água da chuva em povoamento de *Pinus taeda* pelos fluxos de precipitação interna, escoamento pelo tronco e interceptação;
- quantificar o fluxo de cátions e ânions na água da chuva que passa pela floresta de pinus e comparar com a água da chuva que chega ao campo aberto;
- examinar diferenças nas propriedades químicas da solução do solo entre plantio de *Pinus taeda* e área de campo;
- quantificar a biomassa e o estoque de nutrientes em plantação de *Pinus taeda*;
- simular a exportação e manutenção de nutrientes em função de diferentes práticas de colheita florestal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Pinus taeda* e as plantações florestais

De acordo com a FAO (2007), os dados reportados em 2005 mostraram que as coníferas dominam a superfície de florestas produtivas, contribuindo com 54% das áreas plantadas, enquanto as latifoliadas contabilizam 39%, e 7% não foram especificadas. Os gêneros mais plantados são *Pinus* (32%), *Cunninghamia* (11%), *Eucalyptus* (8%) e *Acacia* (5%). Do total, 62% das plantações estão localizadas na Ásia, 17% na Europa, 9% na América do Norte e Central, 6% na América do Sul, 4% na África e 2% na Oceania.

A espécie *Pinus taeda* é originária do Sudeste dos Estados Unidos, região de maior produção de madeira industrial do mundo, com mais de 13,4 milhões de hectares florestados, predominantemente, com *Pinus taeda* (SCHULTZ, 1997; FOX et al., 2007). A alta produtividade em madeira posiciona a espécie entre uma das mais plantadas, com quase 12 milhões de hectares, principalmente, nos Estados Unidos, seguido de Brasil e Argentina (FAO, 2006). Conhecida comumente por *loblolly pine*, é uma espécie extremamente versátil, capaz de crescer em associação com numerosas plantas anuais e perenes, de fácil regeneração e rápido crescimento (SCHULTZ, 1997).

No Brasil, em 2009, a área total de florestas plantadas com *Eucalyptus* e *Pinus* atingiu 6.310.450 ha, apresentando um crescimento de 2,5 % em relação a 2008. A área cultivada com o gênero *Pinus* para o mesmo período teve uma queda de 2,1%. A superfície plantada com esse gênero no país soma 1.794.720 ha, sendo que no Rio Grande do Sul, os plantios com espécies de pinus representam 9,5% do total nacional (ABRAF, 2010).

A Argentina possui uma superfície florestal de 34,4 milhões de hectares, das quais apenas 3% (1,17 milhões) correspondem a plantações (ORA e SAGPYA, 2007). A região da mesopotâmia, conformada pelas províncias de Entre Ríos, Corrientes e Misiones, concentra, aproximadamente, 85% da superfície total florestada no país. A província de Corrientes apresenta uma superfície florestal plantada de 418.134 ha (ELIZONDO e MESTRES, 2009), sendo que o gênero *Pinus* ocupa entre 60 e 70% das plantações.

2.2 Fluxos hídricos

O uso de água pelas plantas pode ser definido, de acordo com Benyon et al. (2007), como a perda total evaporativa, que resulta da interceptação, evaporação do solo e da transpiração, também conhecida normalmente como evapotranspiração. Aproximadamente, dois terços da precipitação global retornam para atmosfera em forma de evaporação, constituindo-se o principal componente do ciclo hidrológico (WALLACE, 1995). O uso da água pelas plantas ou transpiração (movimento da água através do sistema solo-planta-atmosfera) é o mecanismo mais importante de transferência da água do solo para a atmosfera quando o solo está coberto pela vegetação (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2000).

Aproximadamente, 95% da água absorvida pelas raízes é liberada para a atmosfera pela planta como vapor de água (PALLARDY, 2008). Para Cannell (1999), diferenças na transpiração entre tipos de florestas estão geralmente positivamente relacionadas com a produção em volume, ou seja, para condições climáticas e nutricionais comparáveis, quanto mais água transpirada maior a taxa de crescimento das árvores.

Segundo Vincke e Thiry (2008), a vegetação arbórea, devido a sua longevidade e alta capacidade evaporativa, tem uma grande influência no ciclo hídrico, podendo transpirar 80% da evapotranspiração potencial sob alta demanda evaporativa. Assim, a demanda evaporativa da atmosfera, que compreende condições climáticas (como radiação, déficit de pressão de saturação do ar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura) e fatores como condutância e estrutura do dossel, índice de área foliar e disponibilidade de água no solo, determinam as perdas de água por transpiração (CANNELL, 1999). Para Wilk (2000), a utilização da água deve ser vista no contexto de um ciclo, no qual a água absorvida pelas árvores na transpiração retorna novamente à superfície pela precipitação.

Do total da precipitação em um ecossistema florestal, uma porção é interceptada pelo dossel, outra tem o fluxo pelo tronco ou pelo gotejamento das folhas e galhos, como também pode passar pelos espaços abertos do dossel ou ser interceptada pela serapilheira no piso florestal (CHANG, 2006). A interceptação da precipitação pluviométrica nas florestas é um componente importante no balanço hídrico, pois representa uma porção de água que se evapora sem atingir o solo (LIMA, 1976).

A proporção da chuva interceptada depende principalmente do regime de precipitação, como a duração e intensidade. De acordo com Soares e Almeida (2001), as perdas são

maiores em períodos secos, quando as chuvas são menos intensas, mas dependem também das condições meteorológicas que controlam a evaporação, durante e depois da precipitação, e das características da floresta, variando consideravelmente entre espécies, pois a estrutura física do dossel da vegetação e a natureza da folhagem (tamanho e disposição) influenciam as perdas por interceptação. De acordo com Zhang, Dawes e Walker (1999), em média, uma floresta de pinus intercepta 28% da precipitação, comparada com 14% da floresta de eucalipto.

Portanto, as diferenças fisionômicas e estruturais do dossel têm influência na interceptação da chuva e, dessa forma, sobre o balanço hídrico. Perdas por interceptação são geralmente menores para florestas de folhosas do que para florestas de coníferas, sendo que características como menor albedo e maior rugosidade do dossel das florestas de coníferas, comparadas com florestas de latifoliadas, podem explicar essa diferença, pois as coníferas tendem a absorver mais energia (BENYON et al., 2007).

A quantidade da chuva interceptada depende grandemente da estrutura do dossel e das características dos eventos climáticos. De acordo com Crockford e Richardson (2000), as características da floresta que influenciam na interceptação, como número de árvores por hectare, ângulo dos galhos, uniformidade ou falta de uniformidade na altura da copa, espessura da casca, forma da folha e inclinação e índice de área foliar afetam a interceptação e não são sempre fáceis de identificar e quantificar.

A qualidade da água da chuva é alterada ao interagir com a superfície das plantas: ao atravessar as copas das árvores e percorrer a superfície das folhas, ramos e tronco, se enriquece com elementos químicos. Esse aumento se deve em parte à lavagem de partículas depositadas nas árvores (deposição seca) e aos elementos que procedem do interior dos tecidos (lixiviação da copa) (PARKER, 1983; BAKER e ATTIWILL, 1987; BELLOT e ESCARRE, 1989). Conseqüentemente, a composição da água da chuva é influenciada pelas partículas em suspensão na atmosfera e varia de acordo com as condições ambientais, podendo ser influenciada, por exemplo, pela proximidade marítima e de centros industriais (SOUZA et al., 2007).

O escoamento pelo tronco é um processo hidrológico que afeta o ciclo biogeoquímico de nutrientes nas florestas e, por ser uma forma localizada de entrada de água e nutrientes perto do caule das plantas, tem influência na química da solução do solo, na concentração de nutrientes no solo, na umidade do solo e na recarga de águas subterrâneas. Também, pode ter considerável efeito sobre a produtividade das plantas por sua capacidade de alocar nutrientes perto do caule da planta (LEVIA e FROST, 2003). O retorno anual de

nutrientes no piso florestal para os elementos K, Na e S se dá predominantemente via precipitação interna e escoamento pelo tronco e pouco devido à queda da serapilheira. Também, comparado com a taxa de mineralização da decomposição da serapilheira, o fluxo de nutrientes pela precipitação interna e escoamento pelo tronco é muito mais rápida, pois os elementos estão, em sua maioria, em formas inorgânicas, os quais podem ser absorvidos imediatamente pelas árvores (CHUYONG, NEWBERY e SONGWE, 2004).

Evidências atuais sugerem que as plantações florestais reduzem a disponibilidade de água, bem como baixam os níveis dos fluxos superficiais em microbacias pequenas, mas não são esperadas influências em microbacias grandes (VAN DIJK, 2007). Nesse sentido, Keenan et al. (2006) afirmam que a conversão de terras com agricultura por florestas pode reduzir o escoamento e o fluxo superficial anual.

A hidrologia florestal em uma microbacia também pode ser vista sob outros aspectos, como, por exemplo, de regularização do sistema. De acordo com Hamilton (2008), o aumento da disponibilidade de água com o corte da floresta parece desejável para o deflúvio, em curto prazo, na estação seca, mas pode ser um problema durante a estação úmida, quando o aumento do fluxo pode trazer risco de inundações. Também, para Van Dijk e Keenan (2007), em alguns casos, as plantações podem aumentar a recarga do lençol freático por melhorar a infiltração.

A resposta hidrológica da microbacia às plantações florestais vai depender, portanto, da escala da microbacia coberta pelos plantios, que varia em função da idade e da espécie. Lima (2006) descreve que um aspecto importante para o entendimento das relações entre a água e as plantações com espécies arbóreas é a escala do uso da terra e, para o autor, no contexto das melhores práticas de manejo florestal e monitoramento, a microbacia hidrográfica deve estar incorporada como unidade sistêmica, a fim de integrar todos os processos envolvidos no balanço hídrico, em todas as escalas de sustentabilidade.

2.3 Fluxos de nutrientes

De acordo com Switzer e Nelson (1972), a dinâmica dos nutrientes pode ser caracterizada pelo ciclo geoquímico (transferência dos nutrientes entre o ecossistema e compartimentos externos), pelo ciclo biogeoquímico (movimentação dos nutrientes entre solo e a vegetação) e pelo ciclo bioquímico (redistribuição interna dos nutrientes na planta).

Os nutrientes minerais no solo são incrementados pela deposição atmosférica, intemperização das rochas e minerais e decomposição da serapilheira e raízes e liberados pelas plantas. A saída de nutrientes dos ecossistemas ocorre pela liberação na drenagem da água, remoção pela colheita, absorção pelas plantas e volatilização durante a queima (PALLARDY, 2008).

Um conceito simplificado da ciclagem de nutrientes é descrito por Larcher (2006), segundo o qual os minerais são retirados pelas raízes do solo, são mantidos nas plantas e, após a degradação da serapilheira originada pelas plantas, os nutrientes absorvidos retornam aos horizontes superficiais do solo.

As principais fontes de entrada de nutrientes são as deposições atmosféricas (que podem ser secas, como partículas em suspensão, e úmidas, como a precipitação pluvial), intemperismo geológico, fixação biológica do nitrogênio e fertilização. Já as saídas incluem lixiviação, erosão hídrica e eólica, volatilização pelas queimadas ou pela desnitrificação, além de eliminação pelas colheitas (PRITCHETT, 1990). Segundo o autor, as quantidades de entrada e saída de nutrientes anualmente por um ecossistema são influenciadas por fatores como as propriedades do solo, condições climáticas, tipo de vegetação e localização do ecossistema em relação ao mar e regiões industriais.

As florestas são muito eficientes em limpar e reter as entradas atmosféricas devido à sua grande área superficial e resistência aerodinâmica, reduzindo a velocidade dos ventos e, conseqüentemente, a erosão eólica. Essa retenção de elementos pelo dossel é um importante mecanismo ecológico, que permite às árvores prosperarem em solos de baixa fertilidade, bem como a sucessão com espécies mais demandantes em nutrientes (MILLER e MILLER, 1980 apud MORENO e GALLARDO, 2002).

O fluxo atmosférico de nutrientes adquire cada vez mais importância devido ao aumento crescente de elementos emitidos no ambiente. De acordo com Kane et al. (2008), atividades humanas, atualmente, são responsáveis por 40-60% do nitrogênio inorgânico atmosférico, sendo que as elevadas taxas de deposição de óxidos de nitrogênio têm efeitos adversos no funcionamento do ecossistema, incluindo desbalanço foliar de nutrientes, acidificação do solo e aumento da mobilidade de metais.

A composição química da precipitação depende grandemente da localização geográfica e da origem das massas de ar (EATON, LIKENS e BORMANN, 1973), pois as partículas podem ser de fontes oceânicas ou terrestres (resultado da poluição), biogênicas ou vulcânicas (ATTIWILL, 1966). Segundo o autor, a quantidade de elementos lixiviados é maior durante precipitações de baixa intensidade.

Além dos elementos que chegam com a água da chuva, outros entram no ecossistema por meio de partículas transportadas pelo ar e vapores que contribuem de maneira significativa às necessidades nutricionais das florestas, sendo a deposição seca um importante mecanismo de entrada atmosférica, ocorrendo, principalmente, por absorção de vapor para nitrogênio, enxofre e acidez livre e pela deposição de partículas para cálcio e potássio (LINDBERG et al., 1986).

Ao interagir com a vegetação, a água da chuva pode sofrer alterações em várias de suas características qualitativas. As alterações químicas se devem, principalmente, ao lavado dos elementos aderidos em seco sobre folhas, ramos e caule (adição de elementos ao ecossistema) ou pela lixiviação foliar (representando circulação interna de elementos no ecossistema) (ATTIWILL, 1966; EATON, LIKENS e BORMANN, 1973). Esse efeito é particularmente importante em florestas, pois ocorre alteração tanto na composição química quanto em aspectos físicos na água da chuva que penetra através das copas das árvores. Dessa maneira, ao interagir com as copas das árvores, a água da chuva arrasta quantidades apreciáveis de nutrientes, desempenhando papel significativo na ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais (LIMA e BARBIN, 1975).

Segundo Taiz e Zeiger (2009), um aumento na disponibilidade de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) dissolvidos na água da chuva, um processo conhecido como deposição atmosférica de nitrogênio, está alterando ecossistemas nos Estados Unidos. Para Vitousek et al. (1997), algumas atividades afetam a atmosfera diretamente, como a combustão de combustíveis fósseis ou outros processos a altas temperaturas que emitem monóxido de nitrogênio (NO). Indiretamente, por exemplo, a fertilização da agricultura aumenta a concentração de amoníaco (NH_3) volátil nos solos e aumenta o processo microbial de N fixado. Segundo Boxman, Peters e Roelofs (2008), a deposição nas florestas de nitrogênio predominantemente na forma de nitrato de amônio é o resultado da emissão da pecuária intensiva em áreas circundantes às das plantações. De acordo com os autores, devido à rugosidade do dossel, as florestas de coníferas são conhecidas por serem muito eficientes em interceptar a deposição seca.

Em trabalho realizado no Congo, Laclau et al. (2003a) descrevem a ciclagem de nutrientes em uma plantação de eucaliptos e em savana, mostrando que os nutrientes disponíveis acima do solo nas árvores retornam ao solo através da serapilheira, que a composição química da precipitação foi influenciada principalmente pela proximidade marítima e por fontes como a queima de biomassa e que o transporte de poeira do solo a

grandes distâncias, através do deserto africano, pode ter influenciado as altas quantidades de cálcio observadas.

Na Tabela 1, podem-se observar resultados do fluxo de nutrientes verificados por diferentes autores.

Tabela 1- Fluxo de nutrientes na precipitação global (PG) em lugar aberto, precipitação interna (PI) no interior da floresta, escoamento pelo tronco (ETr) e deposição seca (DS) na floresta, em diferentes lugares e tipos vegetação.

Autor e Lugar	Tipo de vegetação	Tipo de fluxo	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹					
			N	P	K	Ca	Mg	Na
Lopes, Schumacher e Viera (2010), RS-Brasil	<i>Pinus taeda</i>	PG	-	-	11,1	4,9	1,5	35,2
		PI	-	-	18,1	4,7	1,5	33,8
		ETr	-	-	2,6	0,5	0,3	2,9
Dezzeo e Chacón (2006), Venezuela	Savana aberta	PG	1,3	0,0	2,2	0,8	1,3	-
	Floresta alta	PI	0,58	0,17	36,4	5,73	4,81	-
	Floresta alta	ETr	0,09	0,04	7,84	1,22	0,61	-
Laclau et al. (2005), Congo	Savana	PG	4,8	0,3	2,7	3,3	1,4	-
	<i>Eucalyptus</i>	DS	6,5	0,3	3,8	4,5	1,8	-
Liu, Fox e Xu (2002), China	Floresta subtropical úmida	PG	10,5	1,25	2,97	7,95	3,23	1,72
		PI	12,1	1,46	33	15,3	8,04	2,16
Lima (1985), SP-Brasil.	<i>Pinus oocarpa</i>	PI	-	-	13,9	3,3	1,7	0,0
	<i>Pinus caribaea</i>	PI	-	-	18,6	5,8	1,6	0,8
	Cerradão	PI	-	-	67,8	6,8	7,1	0,0
Westman (1978), Austrália.	<i>Eucalyptus</i>	PG	60	0,16	3,4	3,2	5,9	50
		PI	35	-	8,5	14	7,2	44
		ETr	0,8	-	0,9	0,8	1,1	8,1

A ciclagem de nutrientes pode ser analisada por meio da distribuição da biomassa acumulada nos diferentes estratos e da quantificação das taxas de nutrientes que se movem através dos diferentes compartimentos, como também pela produção de serapilheira e sua decomposição, lixiviação das copas e outros. A biomassa arbórea acima do solo, o piso florestal, a biomassa das raízes no solo e outros fatores podem ser considerados compartimentos da floresta (POGGIANI e SCHUMACHER, 2004). De acordo com os autores, pelos processos de lixiviação e decomposição, os nutrientes chegam ao solo e novamente são absorvidos pelo sistema radicular das árvores.

A acumulação anual de nutrientes pode ser considerada como a diferença entre a absorção de nutrientes total e a que se devolve ao solo em forma de raízes mortas, produção de serapilheira e lavado das folhas (PRITCHETT, 1990). Ainda, segundo o autor, a

acumulação de nutrientes segue, em geral, a expansão da biomassa, aumentando de maneira linear ou exponencial durante os períodos iniciais de rápido crescimento e a um ritmo decrescente quando a floresta alcança o estágio adulto. As concentrações de nutrientes nos diferentes compartimentos variam de acordo com a espécie, as condições do solo, o clima e a idade da floresta (POGGIANI et al., 1983).

De acordo com Binkley, Giardina e Bashkin (2000), a produtividade das plantações florestais depende grandemente da disponibilidade de nutrientes no solo. Vose e Allen (1988) e Albaugh et al. (1998) relatam que a baixa disponibilidade de nutrientes é a principal causa para que a produtividade de *Pinus* no Sudeste dos Estados Unidos esteja abaixo da produtividade potencial e, segundo Fox et al. (2007), o nitrogênio e o fósforo são os nutrientes que mais comumente limitam o crescimento dessas plantações. Já no Brasil, a alta taxa de mineralização de N orgânico do solo é uma das razões porque a maioria das plantações de eucalipto na primeira rotação possui pouca ou nenhuma resposta à fertilização com nitrogênio (GONÇALVES et al., 2008).

Os nutrientes chegam à superfície da raiz por dois mecanismos principais: fluxo de massa e difusão. O fluxo de massa é o transporte de nutrientes na água do solo, pois devido à transpiração a água se move no sentido da raiz por diferença de potencial hídrico (TAIZ e ZEIGER, 2009). Esse mecanismo fornece uma proporção significativa de nutrientes que estão presentes em altas concentrações na solução do solo ou são quase exclusivamente da fase de solução (móvel), por exemplo, nitrato, na maioria dos solos. Se o fornecimento de nutrientes por fluxo de massa é inferior à taxa de absorção, a concentração na solução diminui na superfície da raiz, os nutrientes então se difundem por um gradiente de concentração. Esse mecanismo de abastecimento de nutrientes é particularmente importante para os nutrientes que são relativamente imóveis, por exemplo, fosfato, na maioria dos solos. A importância relativa do fluxo de massa e difusão depende do conteúdo de água no solo, do índice de absorção de água, do grau de interação com nutrientes na fase sólida, das concentrações de nutrientes na solução do solo e da demanda pela planta (SMETHURST, 2000).

Entre os nutrientes, o nitrogênio é o requerido em maior quantidade pelas plantas e, apesar de ser um dos elementos mais abundantes no ecossistema florestal, comumente é o nutriente que mais restringe o crescimento das árvores (PRITCHETT, 1990). O nitrogênio se encontra disponível no solo em diversas formas, incluindo amônio, nitrato, aminoácidos, peptídeos e formas complexas insolúveis, porém, apenas uma pequena parte do nitrogênio total do solo encontra-se nas formas inorgânicas de amônio, nitrato e nitrito, sendo estas as principais formas aproveitáveis pelas plantas (RAIJ, 1991; SOUZA e FERNANDES, 2006).

Já o potássio é o cátion mais abundante nas plantas, sendo absorvido em grandes quantidades pelas raízes. Tem importante função no estado energético da planta, na translocação e armazenamento de assimilados e na manutenção da água nos tecidos vegetais (MEURER, 2006). O potássio nas plantas é altamente móvel, sua utilização é por isso muito eficiente, sendo rapidamente redistribuído das folhas mais velhas para os tecidos mais novos em crescimento. O cálcio é um elemento imóvel no floema e pode se encontrar nas formas trocável e solúvel, sendo a primeira em solos mais argilosos como cátion dominante no complexo de troca (65%), seguido de Mg (20%), K (5%) e H (10%) (VITTI, LIMA e CICARONE, 2006).

2.4 Solução do solo

Segundo Wolt (1994 apud SMETHURST, 2000), a solução do solo é a fase líquida deste, quase em equilíbrio com a fase sólida, diferenciando-se do conceito de água do solo, que inclui a solução do solo e a água que nele infiltra a uma taxa que impede a obtenção desse equilíbrio.

A visão moderna da fertilidade do solo reconhece o princípio geral de que as plantas obtêm o suprimento imediato de nutrientes na forma de íons inorgânicos inteiramente da solução do solo (HOAGLAND et al., 1920 apud SMETHURST, 2000). A composição química da solução do solo mostra mais rapidamente e sensivelmente que sua fase sólida os efeitos das mudanças do uso do solo ou perturbações no ecossistema (LILIENFEIN et al., 2000; RANGER, MARQUES e JUSSY, 2001).

Se a importância da solução do solo foi reconhecida há muito tempo, as razões, segundo Smethurst (2000), de não ser utilizada como base para o manejo da fertilidade do solo, deve-se, principalmente, à dificuldade de amostragem e à grande variabilidade temporal e espacial. A solução do solo é difícil de amostrar porque, na maioria dos solos utilizados para a agricultura, esta é retida sob altas tensões ($> 0,08$ MPa), necessitando força centrífuga ou de sucção. Segundo o autor, dos métodos utilizados, os lisímetros de tensão são os que melhor fornecem amostras representativas da solução do solo.

A composição da solução do solo é o resultado de processos complexos: entrada de elementos da precipitação, gotejamento (precipitação interna) e escoamento pelo tronco, bem como da produção interna (mineralização de matéria orgânica e intemperização), da troca

iônica e da saída por absorção das raízes e por lixiviação, sendo grandemente influenciada pela estrutura do povoamento e pelos padrões estacionais (MARQUES e RANGER, 1997; RANGER, MARQUES e JUSSY, 2001; LACLAU et al., 2003b).

A solução do solo em plantação de eucaliptos e em savana no Congo mostrou uma excepcional pobreza em nutrientes na solução, quando comparada com outros ecossistemas florestais. Segundo Laclau et al. (2003b), esse aspecto pode ser devido a: i) baixa quantidade de nutrientes disponíveis no solo, e ii) baixos níveis de nutrientes liberados pela intemperização dos minerais do solo. A baixa concentração de nutrientes na solução mostrou que a otimização da silvicultura com a entrada de nutrientes (adubações, manejo da matéria orgânica) provavelmente melhorará a produção das plantações.

Baeumler e Zech (1998), estudando o impacto do desbaste na química da solução do solo em florestas dos Alpes na Alemanha, concluíram que a remoção de 40% das árvores causou fortes mudanças na solução do solo e que, exceto para silicato e sulfato, a concentração de todos os cátions e ânions aumentou, principalmente devido ao aumento da mineralização e à redução da retirada de nutrientes pelas raízes. O nitrato e o amônio foram os elementos que mostraram os efeitos mais pronunciados. No entanto, a química da solução retornou às condições prévias um ano depois do desbaste.

Nesse sentido, medições qualitativas da solução do solo de um povoamento florestal e sua quantificação fornecem informações relevantes sobre ciclagem de nutrientes e a produtividade potencial do sítio (MARQUES e RANGER, 1997).

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL

3.1 Localização

O experimento foi instalado em uma área localizada na Fazenda Timbaúva, pertencente à empresa Forestal Bosques del Plata S.A., nas coordenadas geográficas de 27° 59'45" Latitude Sul e 55° 57'16" Longitude Oeste e a uma altitude de 150 m sobre o nível do mar, no Nordeste da província de Corrientes, Departamento de Santo Tomé, localidade de Gobernador Virasoro, Argentina (Figura 1 e Figura 2).

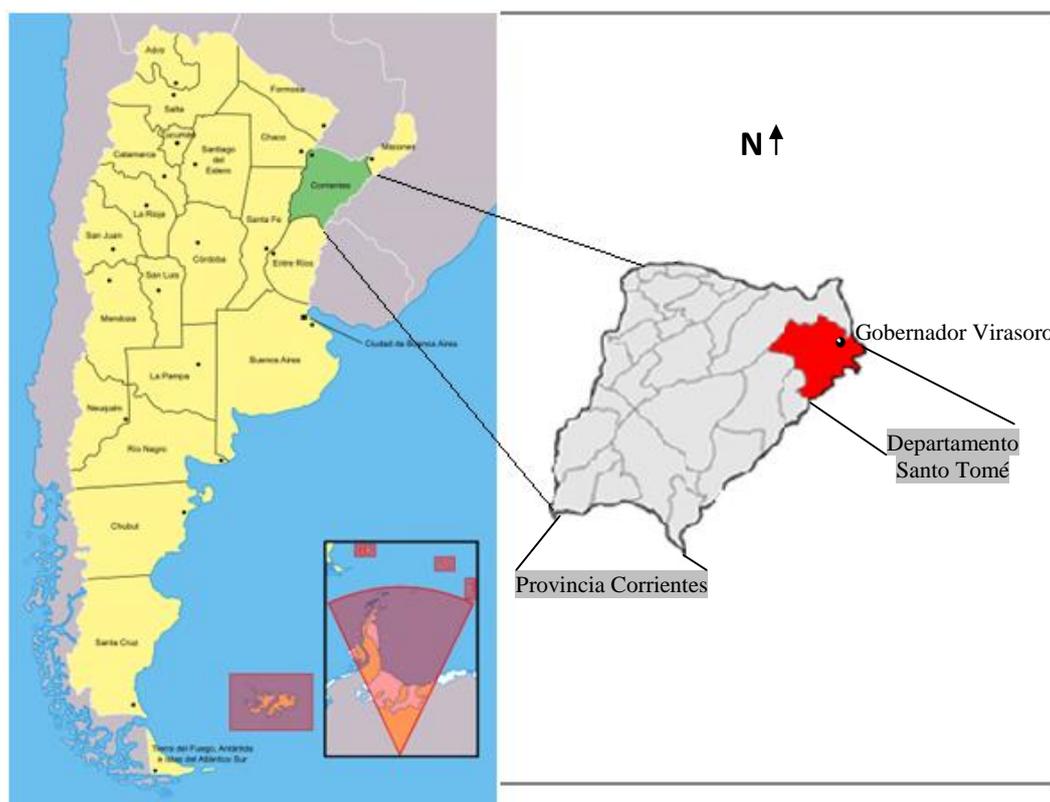


Figura 1 - Localização da cidade de Gobernador Virasoro, Corrientes, Argentina. Adaptado de Wikipédia (2010).



Figura 2 - Vista da área experimental- os quadros em verde indicam a posição do estudo no povoamento de *Pinus taeda* e na área de campo, e o retângulo em vermelho a localização da estação meteorológica. Gob. Virasoro, Corrientes, Argentina. Fonte: Google Earth (2009).

3.2 Vegetação

A fitogeografia da região corresponde ao distrito dos campos ou savanas de gramíneas de um metro a um metro e meio de altura. A floresta somente aparece na beira dos rios e lagunas, em forma de galerias, ou formando pequenas manchas ou ilhas em lugares onde se acumula a umidade no solo (CABRERA, 1976). De acordo com Carnevalli (1994), a vegetação dominante das savanas secas apresenta *Andropogon lateralis* Nees, *Elyonurus* sp., *Axonopus* sp., *Paspalum notatum* Alain ex Flügge e *Vernonia chamaedrys* Less. como espécies principais.

3.3 Clima

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido, descrito como temperado chuvoso, apresentando verões muito quentes e úmidos e sem estação seca (Cátedra de Climatología Agrícola, 2009). A temperatura média anual da região é de 21°C, com um regime de precipitação anual de 1725 mm (média dos últimos 17 anos,

dados não publicados, coletados na Estação Meteorológica do Instituto Agrônomo Víctor Navajas Centeno, em Virasoro).

3.4 Solo

Os solos da região são caracterizados por formações de basalto, bem drenados, denominados solos vermelhos. Sua taxonomia, segundo o sistema de classificação da Soil Taxonomy (USDA, 1999), corresponde a *Typic Kandihumults* (Ultisoles). A série na classificação Argentina é a Diaz de Vivar (ESCOBAR et al., 1996). São solos que possuem no horizonte argiloso predomínio de argilas com baixa capacidade de troca, sendo que as porcentagens de argila se mantêm elevadas até altas profundidades, de drenagem mais ou menos livre. Geralmente, ocorrem em áreas com relevo suave ondulado até forte ondulado, com pendente média de 2 a 5%. De acordo com Escobar et al. (1996), são solos profundos, com um horizonte superficial argiloso, bruno avermelhado escuro de estrutura granular. O horizonte Bt2, com mais de 100 cm de espessura, é de cor vermelha uniforme. Esses solos são de reação ácida a medianamente ácida. O conteúdo de matéria orgânica é elevado no horizonte superficial, onde se encontram os níveis mais altos de troca de bases e capacidade de troca de cátions (Tabela 2). Apresentam concreções de ferro-manganês e restos de material originário ao longo do perfil. Também, são considerados de mediana a baixa fertilidade química, causada pelo tipo de argila predominante de baixa atividade (caulinitas). A erosão hídrica é uma das limitantes desse tipo de solo.

Tabela 2- Características químicas e físicas do solo da região.

Hz	Prof. cm	M.O	Granulometria				pH	Cátions trocáveis								
			Argila	Silte %	Areia Fina	Areia Grossa		Ca	Mg	K	Na	H	Al	T	V	m
A	0-10	4,83	50,0	39,3	9,2	1,5	5,8	6,0	5,0	0,48	0,4	9,4	0,1	18,2	65	0,8
Ap	10-28	4,47	46,0	35,7	15,7	2,6	5,4	5,1	3,6	0,54	0,4	12	0,1	16,9	57	1,1
Bt1	28-87	2,05	68,1	25,0	5,9	0,8	5,4	2,4	1,6	0,1	0,3	11	0,15	15,8	28	25,0
Bt2	87-130	1,22	75,7	19,1	4,4	0,8	5,5	2,4	1,5	0,11	0,4	10	1,5	10,8	40	25,3
Bt3	130+	0,72	76,7	19,0	3,6	0,7	5,5	2,6	1,9	0,11	0,3	10	1,4	10,2	48	22,1

Hz= horizontes; T= capacidade de troca de cátions total; V= saturação de bases; m= saturação por alumínio. Areia fina= (0,05 - 0,2 mm) e Areia grossa= (0,2 - 2 mm). Fonte: Escobar et al.(1996).

3.5 Histórico da área de estudo

O estudo foi realizado em um povoamento de 52 ha, estabelecido no ano 1997, com *Pinus taeda* procedente de sementes de um pomar clonal de primeira geração do condado de Marion, Florida, USA. As mudas foram produzidas em tubetes e o plantio foi manual, sem adubação, em espaçamento de 4 m x 1,75 m. O preparo do solo foi realizado com um subsolador a 50 cm de profundidade. A mato competição foi controlada de forma mecânica (roçada) e química (glifosato), e o combate à formiga foi feito com a aplicação de iscas granuladas (sulfluramida).

Na área do estudo, encontra-se instalado, desde o ano de 2000 (idade da plantação 3 anos), um experimento de fertilização de meia rotação chamado “Regionwide 18 – *Responses to nutrient additions in young loblolly pine plantations*”, em convênio entre a empresa Bosques del Plata e a Forest Nutrition Cooperative, North Carolina, USA. O desenho experimental é de 4 blocos inteiramente casualizados, 4 repetições e 40 parcelas de 0,2 ha, cada uma (incluindo áreas *buffers*) com 60 árvores de medição.

O presente estudo foi instalado em uma parcela testemunha (sem fertilização) de 60 árvores do experimento Regionwide 18, onde, desde sua instalação, realizam-se medições anuais das árvores da parcela, com a determinação da altura total, altura de copa viva e diâmetro à altura do peito (DAP). Também são realizadas coletas mensais da serapilheira e análise nutricional das acículas do terço superior da copa. No ano de início do experimento, foi efetuada análise de solo do horizonte A.

A instalação do presente experimento foi realizada no mês de julho de 2009, tendo o plantio completado 12 anos de idade, com a coleta de dados iniciada no mês de agosto de 2009.

3.6 Crescimento de *Pinus taeda* na área do estudo

Para determinar o crescimento do povoamento de *Pinus taeda* na área do estudo, foram utilizadas medições de altura total e DAP, realizadas nas idades 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 anos, das 4 parcelas testemunhas (60 árvores por parcela) do experimento Regionwide

18. O volume total de madeira com casca foi estimado utilizando-se o modelo Prodan modificado, ajustado para *Pinus taeda* para a região por Fassola et al. (2006):

$$\ln(vcc) = (-9,52543 + 2,42573 * \ln(dap) - 0,07546 * \ln^2(dap) + 0,19513 * \ln^2(h)) * 1,00364003.$$

Determinou-se também a área basal, assim como o incremento periódico anual e o incremento médio anual para cada uma das variáveis analisadas.

A Figura 3 apresenta a distribuição diamétrica do plantio com configuração típica de povoamentos equiâneos, com uma densidade, aos 12 anos de idade, de 1142 árvores ha⁻¹.

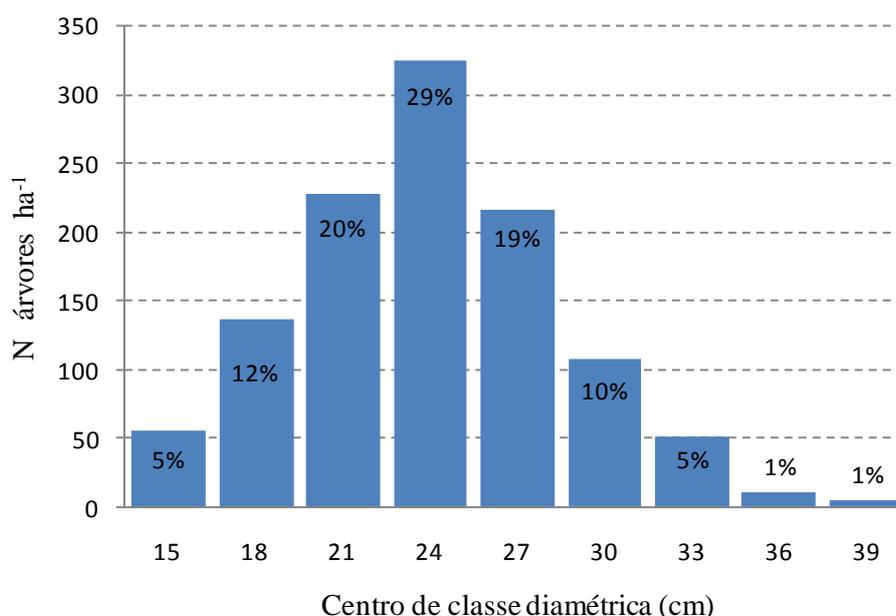


Figura 3 – Número de árvores por classe de diâmetro em povoamento de *Pinus taeda* com 12 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Aos 12 anos de idade, os valores encontrados para altura média foram de 21,0 m; para DAP de 23,1 cm; para área basal de 47,9 m² ha⁻¹ e para volume total de 491,8 m³ ha⁻¹. Os valores máximos de IPA e IMA em área basal foram alcançados aos 5 e 7 anos, respectivamente. O IMA máximo em volume foi de 41 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, aos 12 anos de idade, e o IPA máximo em volume foi de 64,5 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, aos 8 anos de idade (Tabela 3). Esses crescimentos podem ser considerados muito bons quando comparados com os de outras regiões. Por exemplo, Cubbage et al. (2007) citam o crescimento típico de *Pinus taeda* em vários países das Américas, e os valores expostos são de 700 m³ em rotação de 20 anos em

Corrientes, Argentina; 540 m³ aos 18 anos no Brasil; 440 m³ aos 22 anos no Uruguai; e uma produção muito menor nos Estados Unidos de 360 m³ aos 30 anos de idade.

De acordo com Perez et al. (2006), a alta produtividade de *Pinus taeda* em Misiones Argentina estaria sustentada, em grande parte, pelos nutrientes do solo e pela rápida taxa de decomposição da serapilheira. Os autores verificaram a alta eficiência na retranslocação de nutrientes para a espécie, o que evidencia mecanismos de conservação de nutrientes.

Tabela 3 – Crescimento em diâmetro (DAP), altura (h), área basal (G) e volume (V) e seus respectivos incrementos médio anual (IMA) e periódico anual (IPA) de *Pinus taeda* em função da idade.

Idade (anos)	Densidade (N ha ⁻¹)	DAP (cm)	h (m)	G (m ²)	V (m ³ ha ⁻¹)	IMA Dap	IPA Dap	IMA h	IPA h	IMA G	IPA G	IMA V	IPA V
3	1309	9,9	5,7	10,1	29,8	3,3	-	1,9	-	3,4	-	9,9	-
4	1309	13,5	7,5	18,6	68,2	3,4	3,5	1,9	1,8	4,6	8,5	17,1	38,4
5	1309	16,3	9,2	27,2	119,2	3,3	2,8	1,8	1,8	5,4	8,6	23,8	51,0
6	1309	18,4	10,9	34,7	178,1	3,1	2,1	1,8	1,7	5,8	7,5	29,7	58,8
7	1309	19,9	12,6	40,8	241,0	2,8	1,6	1,8	1,7	5,8	6,1	34,4	62,9
8	1309	21,1	14,3	45,6	305,5	2,6	1,1	1,8	1,7	5,7	4,7	38,2	64,5
9	1238	21,9	16,0	46,5	350,2	2,4	0,8	1,8	1,7	5,2	0,9	38,9	44,6
10	1214	22,4	17,7	48,0	403,4	2,2	0,6	1,8	1,7	4,8	1,5	40,3	53,2
11	1142	22,8	19,4	46,8	435,8	2,1	0,4	1,8	1,7	4,3	-	39,6	32,4
12	1142	23,1	21,0	48,0	491,8	1,9	0,3	1,8	1,7	4,0	1,2	41,0	56,0

Também na Tabela 3, pode-se observar que a partir dos 8 anos de idade se iniciou o autodesbaste. A mortalidade natural é acionada quando as árvores começam a competir por recursos, tais como luz, água e nutrientes, de maneira que as plantas com menor capacidade competitiva ficam suprimidas e morrem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Fluxos hídricos e nutricionais em plantação de *Pinus taeda* e em área de campo

O experimento foi instalado em julho de 2009, na área descrita no item 3 (caracterização geral da área experimental). A área com plantação de *Pinus taeda* possuía 12 anos de idade, e a área de campo apresentava presença dominante de gramíneas mantidas a uma altura baixa (corte mecânico frequente), sendo que antes do plantio florestal as duas áreas tiveram o mesmo uso com pecuária extensiva.

4.1.1 Precipitação global (PG)

Na área experimental localizada no campo adjacente à área florestal, a precipitação global foi determinada com a instalação de três coletores de água da chuva, com 20 cm de diâmetro, nivelados e posicionados a 1,50 m de altura do solo. Os coletores em forma de funis tinham um filtro e foram acoplados individualmente a recipientes de fibra de vidro com capacidade para armazenar até 6,5 litros de água (Figura 4). Os coletores e os recipientes para armazenar água foram suspensos em tubos de PVC de 200 mm de diâmetro, os quais permaneceram fixados a estacas de madeira de eucalipto. A área de cada coletor era de $0,03142 \text{ m}^2$, sendo que a chuva em milímetros (mm) foi determinada pela equação: Precipitação (mm) = $x/0,03142$, onde x é o volume em litros acumulado em cada pluviômetro.

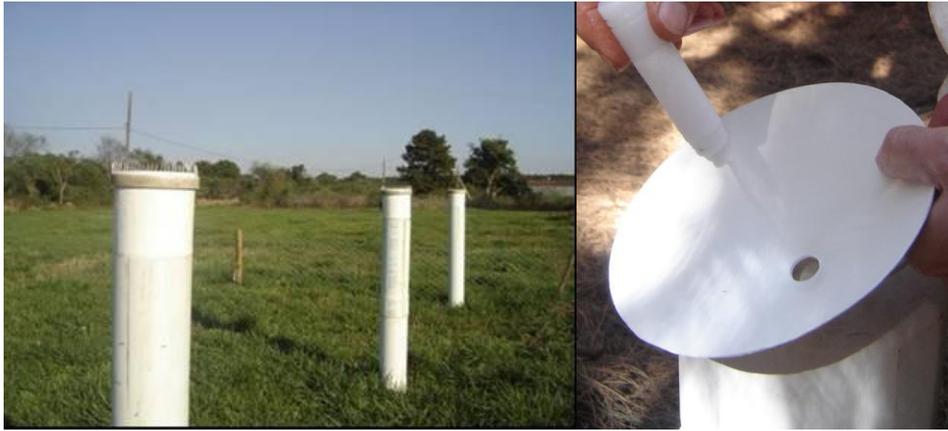


Figura 4 - Aspecto dos coletores de água da chuva instalados no campo.

4.1.2 Precipitação interna (PI)

Na área experimental com *Pinus taeda*, a uma distância de 500 m da área de campo, foram instalados 12 coletores, com 20 cm de diâmetro, nivelados e posicionados a 1,00 m de altura do solo. Sua instalação seguiu a metodologia descrita para a área de campo. Os coletores foram arranjados em quatro posições cada um, repetidos três vezes. As posições foram determinadas em relação às árvores de pinus: na linha entre duas árvores, na entrelinha entre duas árvores, na diagonal entre 4 árvores e ao lado do tronco (embaixo) de uma árvore (Figura 5).



Figura 5 – Aspecto dos coletores da precipitação interna, vistos de uma repetição nas 4 posições, instalados no plantio de *Pinus taeda*.

4.1.3 Escorrimento pelo tronco (ETr)

Para a quantificação e análise química da solução do escorrimento pelo tronco, foram instalados coletores em 12 árvores da parcela de 420 m². Os coletores foram colocados em três árvores consecutivas (repetição) chamadas de parcelas, totalizando 4 parcelas com 3 repetições. As árvores pertenciam a três classes de diâmetro, ou seja, diâmetro médio, diâmetro médio mais um desvio padrão e diâmetro médio menos um desvio padrão. As árvores selecionadas tiveram o DAP variando entre 19,4 e 29,4 cm (o diâmetro médio das 48 árvores vivas na parcela foi de 23,3 cm). As 12 árvores escolhidas também pertenciam a classes de altura dominantes e co-dominantes, nas quais se raspou a casca a partir dos 60 cm de altura da árvore, deixando uma superfície lisa de 1 metro de comprimento para a fixação de mangueiras plásticas transparentes de uma polegada. As mangueiras foram cortadas no sentido longitudinal e foram fixadas no tronco por meio de espuma de poliuretano e silicone incolor, formando canaletas coletoras na forma espiral. Na extremidade inferior, a mangueira desembocava em bombonas plásticas com capacidade para armazenar até 70 litros de água (Figura 6). No final da mangueira, por dentro da tampa do coletor, colocou-se um filtro de *nylon* para evitar a entrada de acículas ou outro material sólido. Em cada parcela, realizou-se uma amostra composta da precipitação armazenada para análise química

Para a transformação do volume de precipitação armazenado em mm de precipitação, determinou-se a lâmina escoada pelo tronco através da relação entre o volume total escoado e o somatório das áreas de captação das 12 árvores. Para determinar a área de captação, mediu-se a projeção vertical da copa de cada árvore ao solo, traçando-se quatro linhas passando pelo tronco (eixo) até as extremidades da projeção, perpendiculares entre si e formando 8 triângulos. A área total de captação foi obtida pelo somatório das áreas triangulares geradas pela ligação entre os pontos extremos das linhas (MARIN, BOUTEN e SEVINK, 2000; MOURA et al., 2009).



Figura 6 - Sistema coletor de água do escoamento pelo tronco.

4.1.4 Interceptação

Este componente foi calculado por diferença, conforme a seguinte equação:

$$I = PG - (PI + ETr)$$

Onde:

I= interceptação (mm);

PG= precipitação global (mm);

PI= precipitação interna (mm);

ETr= escoamento pelo tronco (mm);

PE= precipitação efetiva (que chega ao solo) = (PI + ETr).

4.1.5 Solução do solo

Para estudar a composição química da solução do solo, foram instaladas duas bases de lisímetros de tensão, uma na área de plantio com *Pinus taeda* e outra em área de campo. Em cada base, foram instalados 16 lisímetros, sendo 8 lisímetros posicionados a 30 cm de profundidade e 8 lisímetros a 70 cm. Os lisímetros de tensão foram mantidos com uma força de sucção entre 0,4 – 0,6 bar. Eles eram dotados de uma ponteira de cerâmica porosa de 0,45

µm, que têm por função principal succionar e filtrar a solução do solo nas profundidades indicadas.

Para a instalação dos lisímetros nas posições de 30 e 70 cm de profundidade, foi utilizado um trado de perfil para a abertura dos orifícios e posicionamento dos mesmos (Figura 7). Após a introdução dos lisímetros nos orifícios correspondentes, o solo foi recolocado no perfil, cuidando para que a condição fosse a mais parecida possível com a anterior a da intervenção. Cada lisímetro possuía um capilar plástico transparente, o qual foi colocado dentro de mangueiras negras de 1 polegada de diâmetro enterradas a 20 cm de profundidade. Os lisímetros, pelo meio do capilar plástico, foram conectados a garrafas coletoras, ligadas a uma microbomba de vácuo que, por meio de um *'timmer'*, foi acionada durante o tempo do estudo todos os dias a cada 3 horas, por um período de 20 minutos, a fim de coletar a solução do solo das duas diferentes profundidades e nas duas áreas estudadas. Cada garrafa coletora, no total de quatro em cada área, armazenou a solução do solo vinda de 4 lisímetros em cada profundidade, dessa maneira, as amostras da solução do solo tiveram 2 repetições por profundidade em cada ambiente. Os coletores foram armazenados em uma caixa plástica de 250 l, juntamente com as 4 microbombas de vácuo, o *timmer* e uma bateria (Figura 8).



Figura 7 - Instalação dos lisímetros na área de campo, detalhe do lisímetro com ponta de cerâmica.

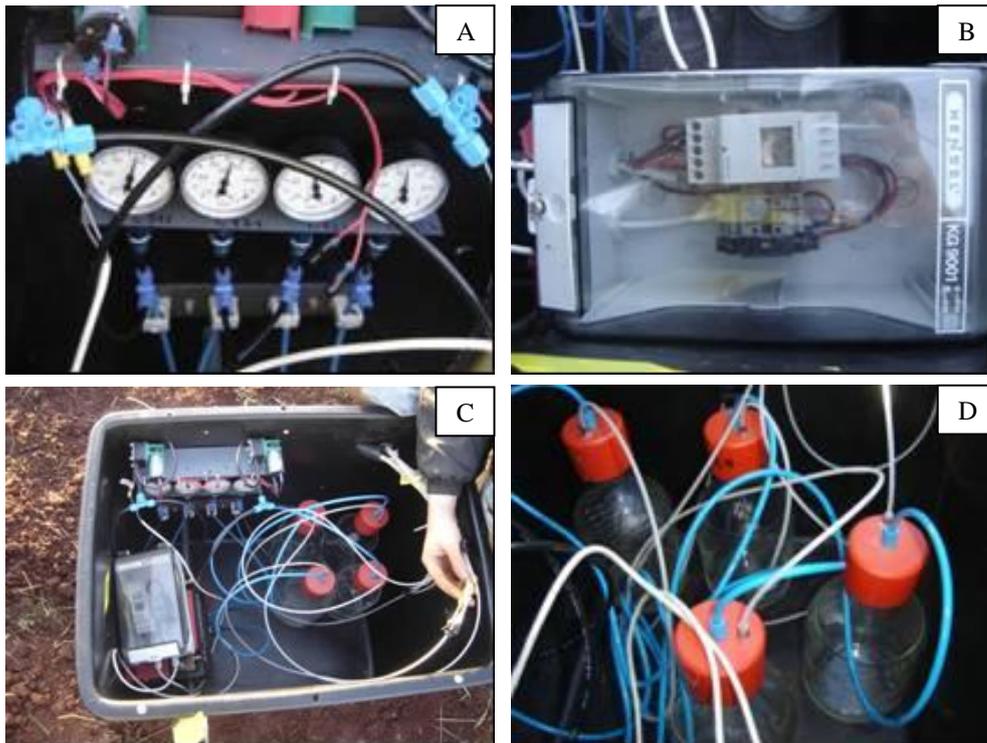


Figura 8 - Detalhe da caixa contendo microbombas de vácuo (A), *timmer* (B), bateria (C) e as garrafas (D) coletoras da solução do solo.

Nas duas áreas do estudo, o local de instalação dos lisímetros foi cercado, para evitar a circulação de pessoas ou animais (Figura 9).



Figura 9 - Vista geral do experimento na plantação de *Pinus taeda* e na área de campo.

4.1.6 Coleta de dados

Quinzenalmente ou quando a capacidade de armazenamento dos recipientes se encontrava próxima do limite máximo, a água armazenada nos coletores, bombonas e vidros, foi coletada e teve seu volume quantificado (no caso da precipitação e do escoamento pelo tronco) por meio de recipientes calibrados de 10 e 4 litros e de uma proveta de 1 litro. A água coletada forneceu amostras compostas, as quais foram armazenadas em frascos de 100 ml. No momento da coleta, acondicionaram-se as amostras em caixa de isopor para posterior congelamento. Após a amostragem, os coletores, bombonas e vidros foram lavados com esponja e água destilada. No final de cada mês, as amostras coletadas quinzenalmente ou em menor período de tempo foram misturadas formando uma amostra representativa mensal, por um período de um ano.

4.1.7 Análises químicas

As amostras dos diferentes fluxos foram analisadas no Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, sendo determinadas as concentrações dos seguintes elementos: NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , bem como o pH e a condutividade elétrica das mesmas, segundo os métodos padronizados para exame de água e esgoto (APHA, 1998). Como pré-tratamento, passaram por filtração simples (poros de 0,45 μm). Em seguida, os ânions foram analisados por cromatografia iônica; cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica; potássio e sódio por fotometria de chama; pH com peagâmetro contendo eletrodo de vidro; e condutividade elétrica com condutivímetro contendo célula de condutividade.

4.1.8 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados da concentração de nutrientes nos diferentes fluxos, primeiramente se procedeu à transformação logarítmica ($\ln(x+1)$), pois algumas

concentrações alcançaram o valor zero, permitindo normalizar a distribuição dos dados e assegurar a homogeneidade das variâncias. A concentração dos elementos nos diferentes fluxos foi comparada usando o procedimento GLM do software SAS (1993), quando a análise da variância foi significativa, analisaram-se as diferenças pelo teste de médias de Tukey. Pela análise do coeficiente de correlação de Pearson, estudou-se a correlação entre o volume de precipitação e a concentração dos elementos nos diferentes fluxos, bem como a correlação dos elementos entre si em cada fluxo.

4.2 Biomassa e nutrientes em plantação de *Pinus taeda*

4.2.1 Quantificação do estoque de nutrientes na biomassa

A caracterização do estado nutricional do povoamento de *Pinus taeda* foi realizada no mês de março de 2010, quando a plantação se encontrava com 12 anos e 9 meses (\cong 13 anos). Primeiramente, foram demarcadas 3 parcelas de 420 m² (17,5 m por 24 m), totalizando 60 árvores por parcela, as quais foram inventariadas, sendo medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) com fita métrica e a altura total com hipsômetro Vertex. Com as informações obtidas no inventário, calcularam-se a média e o desvio padrão da variável diâmetro. Foram selecionadas 3 árvores em cada parcela, totalizando 9 árvores para a amostragem da biomassa acima do solo: 3 árvores com DAP médio, 3 com DAP médio menos 1 desvio padrão e 3 com DAP médio mais 1 desvio padrão.

Para a quantificação da biomassa de raízes, utilizaram-se as 3 árvores com DAP médio, tendo sido o sistema radicular, raízes finas (< 2 mm), grossas (> 2 mm) e toco extraídos por escavação manual do solo em uma área de 7 m² (4 m por 1,75 m) por 1 metro de profundidade, tomando o toco da árvore como o eixo central. O solo escavado nessa área foi peneirado e separado das raízes finas e grossas, sendo separada a camada dos 10 primeiros centímetros para quantificar a biomassa de raízes finas nessa profundidade. Antes de ser obtido o peso úmido, as raízes foram lavadas.

Para avaliar a serapilheira acumulada sobre o solo, foram coletadas 3 amostras com moldura de madeira de 1 m² em cada uma das parcelas do inventário, totalizando 9 amostras.

As árvores selecionadas para a amostragem da biomassa acima do solo foram cortadas a 10 cm do nível do solo e separadas nas seguintes frações: acículas verdes, galhos, casca do tronco, madeira do tronco e cones. A madeira do tronco foi considerada até o diâmetro mínimo de corte de 5 cm, sendo a ponta final considerada junco com a biomassa de galhos. A biomassa total úmida de cada fração foi determinada no campo através da pesagem com balança de gancho e de precisão de 0,1g.

Para cada árvore amostrada, obteve-se a determinação rigorosa do volume de acordo com a metodologia de Smalian (FINGER, 1992), com cubagem de secções do diâmetro com e sem casca, nas seguintes posições: 0,1; 0,3; 1,3; 2,3; 3,3 m; e assim, sucessivamente, a intervalos de 1 metro, até o ápice da árvore.

Para acículas verdes, galhos, cones, raízes grossas, raízes finas e serapilheira acumulada, foi coletada uma amostra representativa de cada componente. Para a casca e a madeira do tronco, foram feitas coletas nas seguintes alturas relativas (porcentagem da altura total): 25%, 50% e 75%, posições em que se cortou um disco de 5 cm para retirar amostras da casca e madeira.

As amostras úmidas foram pesadas com balança de precisão (0,01 g) e acondicionadas em bolsas de papel para secagem em estufa de circulação e renovação de ar a 65°C, até a estabilização do peso, e pesadas novamente para determinação do teor de umidade.

A determinação da biomassa seca das árvores foi realizada indiretamente por meio do teor de umidade das amostras de cada compartimento. A quantidade de nutrientes na biomassa foi determinada multiplicando-se o peso seco do material pelas suas respectivas concentrações de nutrientes.

Após obtenção do peso seco, as amostras foram moídas em moinho de lâminas do tipo Wiley, com peneira de 20 mesh. As determinações analíticas dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S e dos micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, onde foram determinados, seguindo a metodologia sugerida por Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al. (1999), os teores de nitrogênio pelo método Kjeldahl; de fósforo e boro por espectrometria visível; de potássio por fotometria de chama; de enxofre por turbidimetria; e de cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco por espectrofotometria de absorção atômica. A Figura 10 mostra detalhes na obtenção da biomassa.



Figura 10- Aspectos da metodologia empregada na amostragem de biomassa.

4.2.2 Estimativa do estoque de nutrientes disponíveis no solo

Para estimar o estoque de nutrientes até 100 cm de profundidade no solo, foram abertas 3 trincheiras com coleta de amostras nos pontos médios de 5, 15, 30, 50, 70 e 90 cm. Durante a coleta de solo para a análise química, também foram coletados, nos mesmos pontos amostrais, anéis volumétricos para avaliação da densidade do solo de acordo com a metodologia da EMBRAPA (1997). As análises físicas e químicas do solo foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Engenharia Florestal/UFSM, seguindo a metodologia de Tedesco et al. (1995), sendo o P e K extraídos com solução Mehlich – 1; Ca e Mg extraídos por solução de KCl (1 mol l^{-1}); S extraído por solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a 500 mg de P l^{-1} ; B extraído com água quente (55°C); Cu e Zn com HCl 0,1 M.

Já as análises de nitrogênio total e carbono orgânico foram determinadas por combustão seca, no Laboratório de Análises Elementares do Departamento de Solos/UFSM, em auto-analisador CHNS (Modelo Flashea 1112, Thermo Finningan, Milan, Itália).

A estimativa do estoque de nutrientes disponíveis, nas profundidades no solo de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, foi realizada pelo produto entre o volume de solo, a concentração de nutrientes e a densidade de solo obtida no ponto médio de cada camada. No caso do nitrogênio, como a maioria do N total está contida em formas pouco ou não-disponíveis (frações húmicas muito estáveis), para efeito de cálculo, foi considerado apenas 10% como disponível para as plantas (GONÇALVES, MENDES e SASAKI, 2001).

4.2.3 Estimativa de biomassa

A biomassa das árvores de *Pinus taeda* contidas nas parcelas foi estimada por meio de equações de regressão. Para isso, foram testados vários modelos, que foram comparados entre si, com a finalidade de selecionar o de melhor ajuste. As equações foram selecionadas quanto à qualidade do ajuste com base na distribuição gráfica dos resíduos, análise da variância (ANOVA) da regressão, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão da estimativa ($Sy_x\%$). Com o modelo selecionado, calculou-se o peso seco por árvore nas diferentes classes diamétricas do povoamento distribuídas de 2 em 2 cm, estimando-se, dessa forma, a biomassa produzida por hectare com base na área de cada parcela.

O modelo $\ln(y) = b_0 + b_1 \ln(Dap)$ foi o que apresentou melhor ajuste para todos os compartimentos, onde $\ln(y)$ representa o logaritmo natural da biomassa seca (kg por árvore) dos componentes, $\ln(Dap)$ o logaritmo natural do diâmetro (DAP cm) e b_0 e b_1 os coeficientes de regressão. Essa equação também foi a utilizada em outros estudos de biomassa para *Pinus taeda* (ADEGBIDI et al., 2002 e FASSOLA et al., 2010) e para *Eucalyptus globulus* Labill. (SCHUMACHER e CALDEIRA, 2001). A Tabela 4 mostra os valores obtidos dos coeficientes e a qualidade do ajuste para o modelo selecionado; no Apêndice A se pode observar a distribuição gráfica dos resíduos. Devido ao baixo ajuste para cones, não se estimou a sua produção por hectare. A biomassa das raízes foi estimada em função da biomassa média encontrada em 7 m².

Tabela 4 - Coeficientes e qualidade do ajuste do modelo selecionado para árvores de *Pinus taeda* para os diferentes componentes.

Componentes	b_0	b_1	P>F	R^2_{aj}	Syx%
Acícula	-2,6388	1,6540	0,0453	0,43	11,4
Galho	-4,2695	2,4211	0,0131	0,61	9,2
Cone	11,5321	-4,0399	0,1156	0,25	82,4
Casca	-2,8923	1,7194	0,0197	0,56	9,6
Madeira	0,3462	1,5007	0,0001	0,93	1,3
Biomassa copa	-2,7446	2,0657	0,0135	0,61	7,1
Biomassa acima solo	0,3042	1,6110	0,0002	0,90	1,6

b_0 e b_1 : coeficientes de regressão; P>F: análise da variância (ANOVA); R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado; Syx%: erro padrão da estimativa em porcentagem.

4.2.4 Produção de serapilheira

O estudo de produção de serapilheira se encontra instalado desde o ano de 2000, juntamente com o experimento RW18. No total são 360 coletores de 1 m² cada um, distribuídos aleatoriamente, com 9 coletores em cada uma das 40 parcelas do experimento. Os coletores tinham fundo de tela de náilon, com malha de 2 x 2 mm, e foram instalados a 20 cm do solo. A coleta do material depositado nos coletores (acículas e ramas menores a 1 cm de diâmetro) foi realizada mensalmente.

Para analisar a quantidade de nutrientes na serapilheira produzida, as coletas foram realizadas mensalmente nos 9 coletores instalados na parcela testemunha utilizada para o estudo do fluxo hídrico e nutricional. O material coletado foi colocado para secar em estufa a 65 °C até peso constante e, mensalmente, retiraram-se 3 amostras compostas (de cada 3 coletores se realizou uma amostra), que foram enviadas, para análises químicas, ao Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Engenharia Florestal/UFSM, seguindo a metodologia de Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al (1999). A quantidade de nutrientes na serapilheira produzida foi determinada multiplicando-se o peso seco do material pelas suas respectivas concentrações de nutrientes.

4.2.5 Cenários de exportação e manutenção de nutrientes no sítio

Para analisar os reflexos de diferentes intensidades de colheita (corte raso aos 13 anos de idade) sobre o status nutricional do ecossistema, levando em consideração a entrada via deposição atmosférica, foram realizadas três simulações de colheita:

Simulação 1= colheita somente da madeira.

Simulação 2= colheita da madeira mais a casca.

Simulação 3= colheita de toda biomassa acima do solo, permanecendo como resíduo apenas a serapilheira e o sistema radicular das árvores.

Para quantificar o balanço entre saídas e entradas de nutrientes, os valores anuais de entrada pela deposição atmosférica foram extrapolados para 13 anos (idade do povoamento de *Pinus taeda*). Cabe ressaltar que para não sobreestimar a entrada de nutrientes por deposição atmosférica se considerou os valores médios históricos de precipitação (1715 mm). Dessa forma, o balanço foi calculado pela diferença entre a entrada pela deposição atmosférica e a saída pela exportação da biomassa.

Para a estimativa do número de rotações de 13 anos sustentáveis para o povoamento de *Pinus taeda*, consideraram-se o estoque de nutrientes disponíveis no solo até a profundidade de 1 m, o estoque de nutrientes na biomassa que permanece no sítio como resíduo e as entradas via deposição atmosférica, conforme Bizon (2005) e Witschoreck (2008). O número de rotações (NR) foi calculado pela seguinte equação:

$$NR = \frac{\text{estoque no solo} + \text{estoque no resíduo}}{\text{saída pela colheita} - \text{entrada deposição atmosférica}}$$

Onde:

NR = número de rotações de 13 anos;

estoque no solo = nutrientes disponíveis ou trocáveis, até 1 m de profundidade, em kg ha⁻¹;

estoque no resíduo = nutrientes contidos no resíduo florestal, dependendo do método de colheita, em kg ha⁻¹;

saída pela colheita = nutrientes exportados pela colheita florestal, dependendo do método de colheita, em kg ha⁻¹ rotação⁻¹;

entrada via deposição atmosférica = entrada de nutrientes via deposição atmosférica, em kg ha⁻¹ rotação⁻¹.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fluxos hídricos e nutricionais em plantação de *Pinus taeda* e em área de campo

5.1.1 Precipitação

No período do estudo, a precipitação anual foi de 2228 mm, sendo 503 mm superior à média histórica. A temperatura média de 21°C foi igual a da média histórica para a região. A Figura 11 mostra a distribuição mensal da precipitação e temperatura média observadas no período de agosto de 2009 a julho de 2010, com destaque para a precipitação do mês de novembro de 2009, com 427 mm.

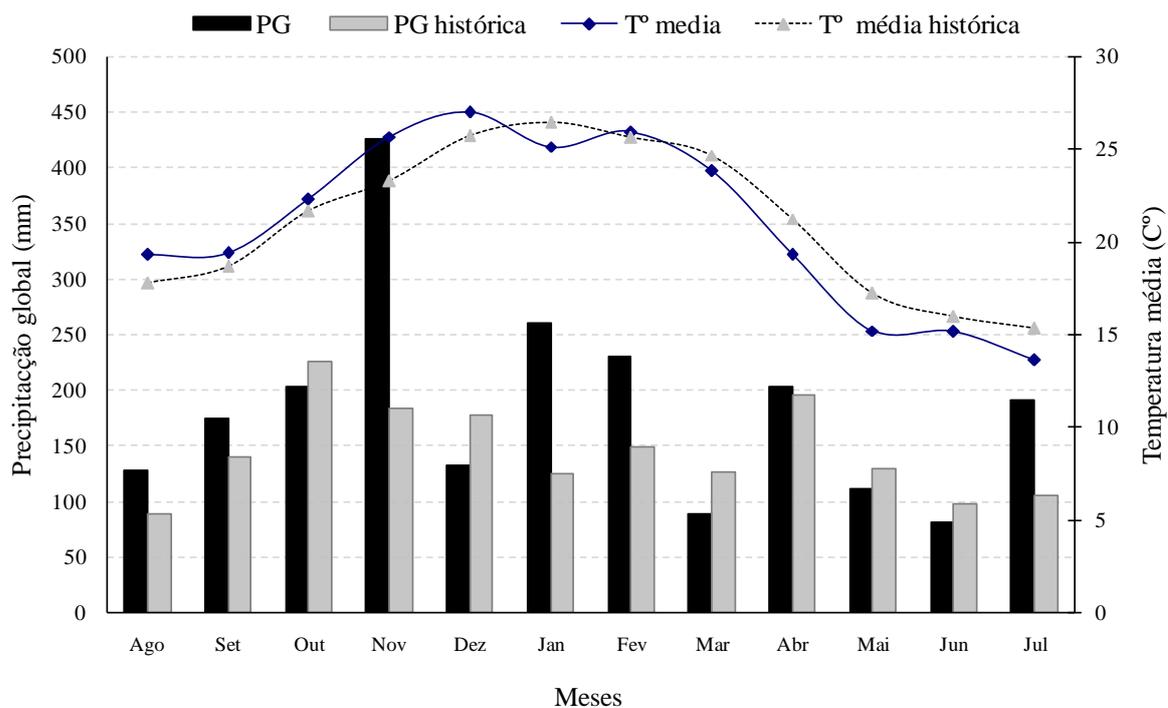


Figura 11 – Precipitação global (PG) e temperatura média (T°) observadas na área do estudo, no período de agosto de 2009 a julho de 2010, e médias históricas (1993-2010), Gob. Virasoro, Argentina.

A análise do regime de chuvas no período de 12 meses estudados mostrou que, do total de 2228 mm de precipitação global, 1559 mm corresponderam à precipitação interna, 105 mm ocorreram pelo escoamento pelo tronco e 564 mm ficaram retidos pela interceptação, o que representa, em porcentagem, 68,9%, 4,6% e 26,5%, respectivamente, em relação à precipitação global. Dessa maneira, a precipitação efetiva que alcançou o solo foi de 73,5%. A Tabela 5 contém a distribuição mensal e anual da precipitação global e sua partição em precipitação interna, escoamento pelo tronco e interceptação.

Tabela 5 – Valores mensais e anual da precipitação global (PG), escoamento pelo tronco (ETr), precipitação interna (PI) e interceptação (I), observados no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área do estudo.

Mês/Ano	PG	ETr	PI	I	% em relação à PG		
	(mm)				ETr	PI	I
Agosto/09	127,4	10,5	82,4	34,5	8,3	64,7	27,1
Setembro/09	174,4	11,9	110,1	52,5	6,8	63,1	30,1
Outubro/09	203,4	11,8	148,2	43,4	5,8	72,9	21,3
Novembro/09	426,7	21,6	313,4	91,8	5,1	73,4	21,5
Dezembro/09	132,2	7,0	88,5	36,7	5,3	66,9	27,8
Janeiro/10	261,0	9,7	185,8	65,5	3,7	71,2	25,1
Fevereiro/10	229,6	8,1	167,9	53,6	3,5	73,1	23,4
Março/10	88,7	3,6	58,7	26,3	4,1	66,2	29,7
Abril/10	202,4	8,4	142,8	51,1	4,2	70,6	25,3
Mai/10	111,0	4,1	75,2	31,7	3,7	67,7	28,6
Junho/10	80,1	0,6	53,9	25,6	0,8	67,3	31,9
Julho/10	190,9	7,8	132,0	51,1	4,1	69,2	26,8
Anual	2228	105	1559	564	4,6	68,9	26,5

O valor de interceptação de 26,5% no povoamento de *Pinus taeda* com 12 anos de idade coincide com os resultados de Zhang, Dawes e Walker (1999), que relatam que, em média, a interceptação para plantação de pinus é de 28%. Resultados de interceptação em estudos com eucalipto na Austrália, Índia e Israel variam de 10 a 34% da precipitação anual (CALDER, 1986; WHITEHEAD e BEADLE, 2004).

Outros estudos mostram resultados esperados para o gênero *Pinus*. Por exemplo, Llorens et al. (1997) verificaram uma interceptação de 24% para uma plantação de *Pinus sylvestris* L., com 33 anos de idade e 2400 árvores ha⁻¹, na Espanha. Também Lopes e Schumacher (2010) verificaram em plantação de *Pinus taeda* no Sul do Brasil, a precipitação

global de 2031 mm ano⁻¹, a precipitação interna 1243,8 mm ano⁻¹, a interceptação média mensal de 32,5% e o escoamento pelo tronco de 4,9%.

Já Huber, Iroum e Bathurst (2008), para *Pinus radiata* D. Don no Chile, destacam que os valores de interceptação variaram de 36% a 40% em sítios onde a precipitação anual foi menor a 1200 mm, e somente 15% da precipitação foi interceptada em sítios onde a precipitação anual foi de 2081 mm.

No presente trabalho, a interceptação na plantação de pinus com 12 anos de idade em uma densidade de 1142 plantas por hectare teve uma variação no período estudado de 21,3% a 31,9%, sendo que a maior interceptação ocorreu no mês de menor precipitação, ao passo que no mês de maior precipitação a interceptação foi de 21,5%.

Llorens et al. (1997), em estudo de *Pinus sylvestris* na região do Mediterrâneo, obtiveram distintas porcentagens de interceptação para condições diferentes de precipitação. Para eventos com baixa intensidade e condição atmosférica úmida, a interceptação foi de 15%; para eventos de precipitação curta, alta intensidade e condições secas, o valor de 13% foi observado; já para precipitações com tempo médio, baixa intensidade e condições secas a interceptação alcançou 49%.

Da mesma forma, Scheer (2010) encontrou valores mensais para a interceptação na Mata Atlântica no Sul do Brasil, que variaram de 12 a 31% durante os meses chuvosos (precipitação acima de 200 mm mensal) e de 1 a 45% nos meses mais secos (precipitação abaixo de 50 mm mensal), indicando alta variabilidade nesse período.

Llorens e Domingo (2007), em um estudo de revisão da partição das chuvas na zona mediterrânea da Europa, mostraram que a média (várias espécies arbóreas estudadas) da precipitação interna foi de 78,8% e o escoamento pelo tronco foi de 3,2%.

5.1.2 Valor de pH

Os valores médios do pH para os diferentes fluxos analisados podem ser vistos na Tabela 6, onde se observa que a média do pH da água da chuva foi de 5,4. O pH da solução do solo no campo (nas duas profundidades estudadas) obteve o maior valor (6,2) diferindo significativamente ($p < 0,05$) do pH dos demais fluxos. O menor valor do pH (4,9) foi verificado no escoamento pelo tronco, mostrando uma acidificação do pH pela passagem da água pelo tronco das árvores de pinus, devido que, geralmente o pH do escoamento pelo

tronco é influenciado fortemente por ácidos orgânicos, liberados pelos tecidos do tronco (PARKER, 1983; UYTENDAELE e IROUMÉ, 2002).

Tabela 6 – Valores médios de pH observados nos diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.

Fluxos	pH			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Solução do solo no campo a 30 cm	6,2 ^a	0,53	5,6	7,2
Solução do solo no campo a 70 cm	6,2 ^a	0,42	5,7	7,0
Solução do solo no pinus a 70 cm	5,9 ^b	0,42	5,3	6,5
Precipitação interna (PI)	5,8 ^b	0,32	5,4	6,5
Solução do solo no pinus a 30 cm	5,7 ^b	0,48	5,0	6,6
Precipitação global (PG)	5,4 ^c	0,29	5,0	6,1
Escorrimento pelo tronco (ETr)	4,9 ^d	0,24	4,7	5,5

Médias com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Resultados semelhantes foram verificados por autores como Levia e Frost (2003), que reportaram um pH para o escoamento pelo tronco menor que o da precipitação global para florestas expostas a altas taxas de poluição atmosférica na região mediterrânea da Europa. Também Crockford, Richardson e Sageman (1996), em estudo com pinus no Sudeste da Austrália, encontraram valores de pH de 5,3 para a precipitação global e de 4,2 para o pH no escoamento pelo tronco, em sítio não exposto a uma significativa deposição ácida. Já para diferentes espécies de eucaliptos, os autores observaram valores de pH do escoamento pelo tronco entre 3,5 a 5,4. No Brasil, Miranda et al. (2006) constataram que o pH médio mensal da solução de solo variou de 4,3 a 5,3, sendo mais elevado que o pH do solo. Também destacaram que o pH da solução do solo (4,3) sob cafeeiro foi mais ácido que os demais valores de pH para soluções do solo sob outras culturas vegetais, como mata e pastagem.

A distribuição mensal dos valores de pH (Figura 12) mostra que, no escoamento pelo tronco, houve menor flutuação, sendo a maior variação constatada na solução do solo a 30 cm de profundidade nos dois locais estudados. Cabe ressaltar que, nos meses de abril, maio e junho, os valores do pH para alguns fluxos da solução do solo não foram determinados devido à quantidade de amostra, que foi insuficiente para a realização da análise.

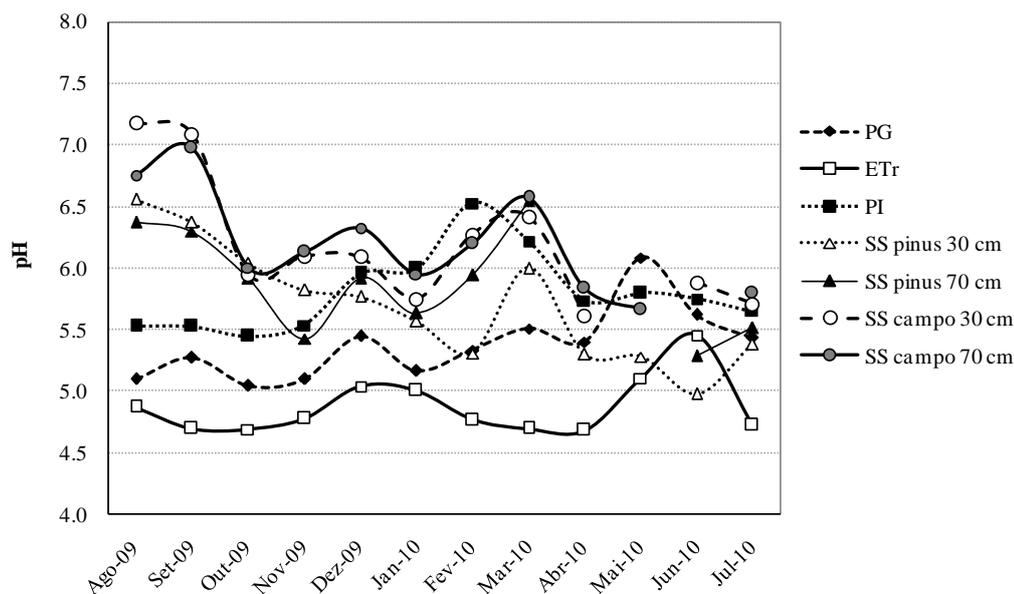


Figura 12 – Variação mensal do pH por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoimento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.

5.1.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é um indicador de íons na solução aquosa. Os maiores valores de condutividade elétrica foram verificados na solução do solo sob a área de *Pinus taeda*, sendo esta significativamente superior aos valores para os demais fluxos (Tabela 7). E o menor valor foi observado na precipitação global. A condutividade elétrica média da água da chuva ficou em torno de $12 \mu\text{S cm}^{-1}$, da precipitação interna e escoimento pelo tronco em $30 \mu\text{S cm}^{-1}$, da solução do solo em área de campo em 50 e $72 \mu\text{S cm}^{-1}$ e da solução do solo na plantação de pinus de 200 a $233 \mu\text{S cm}^{-1}$, dependendo da profundidade.

Tabela 7 – Condutividade elétrica média nos diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.

Fluxos	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Solução do solo no pinus a 70 cm	232,77 ^a	53,5	145,7	318,0
Solução do solo no pinus a 30 cm	200,62 ^b	67,44	25,8	282,0
Solução do solo no campo a 30 cm	72,37 ^c	44,66	26,1	163,8
Solução do solo no campo a 70 cm	50,41 ^{cd}	18,64	22,1	84,0
Escorrimento pelo tronco (ETr)	30,42 ^{de}	10,79	14,6	47,7
Precipitação interna (PI)	30,16 ^{de}	9,06	12,5	46,3
Precipitação global (PG)	11,72 ^e	4,25	5,8	19,0

Médias com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O aumento da condutividade elétrica desde a precipitação global e à medida que vai passando pelos diferentes fluxos de precipitação interna, escorrimento pelo tronco e solução do solo indica um aumento da concentração de íons nesses fluxos, pois a condutividade elétrica reflete a capacidade de uma solução aquosa em conduzir corrente elétrica. De acordo com Parker (1983), a água da chuva, ao interagir com a vegetação, aumenta a quantidade de sais. Dessa forma, os maiores valores da condutividade na solução do solo no povoamento de pinus mostram que a floresta concentra a entrada de íons no solo com o passar do tempo, devido ao processo hidrológico, à deposição seca e à reciclagem nos horizontes superficiais.

No México, Silva e Rodríguez (2001) verificaram valores médios semelhantes (com poucos íons dissolvidos) para a condutividade elétrica da precipitação global ($15 \mu\text{S cm}^{-1}$). Já para a precipitação interna no povoamento de *Quercus* sp. ($62 \mu\text{S cm}^{-1}$) e em floresta mista de *Quercus* sp. e *Pinus pseudostrobus* Lindl. ($104 \mu\text{S cm}^{-1}$), a condutividade elétrica no escorrimento pelo tronco variou de $113 \mu\text{S cm}^{-1}$ no povoamento de pinus a $188 \mu\text{S cm}^{-1}$ na floresta mista com as duas espécies mencionadas. Por outro lado, Calil (2008) observou valor médio maior (em torno a $53 \mu\text{S cm}^{-1}$) para a condutividade elétrica da água da chuva na região Sul do Rio Grande do Sul.

Os baixos valores de condutividade elétrica observados na precipitação global (água da chuva) indicam que na região do estudo a poluição atmosférica é baixa.

A variação mensal da condutividade elétrica (Figura 13) mostra que a maior flutuação ocorreu na solução do solo sob plantação de pinus, e a menor, na precipitação global. Os valores da condutividade nos meses de abril, maio e junho, para alguns fluxos da solução do solo, não foram determinados devido à quantidade de amostra, que foi insuficiente para a realização da análise.

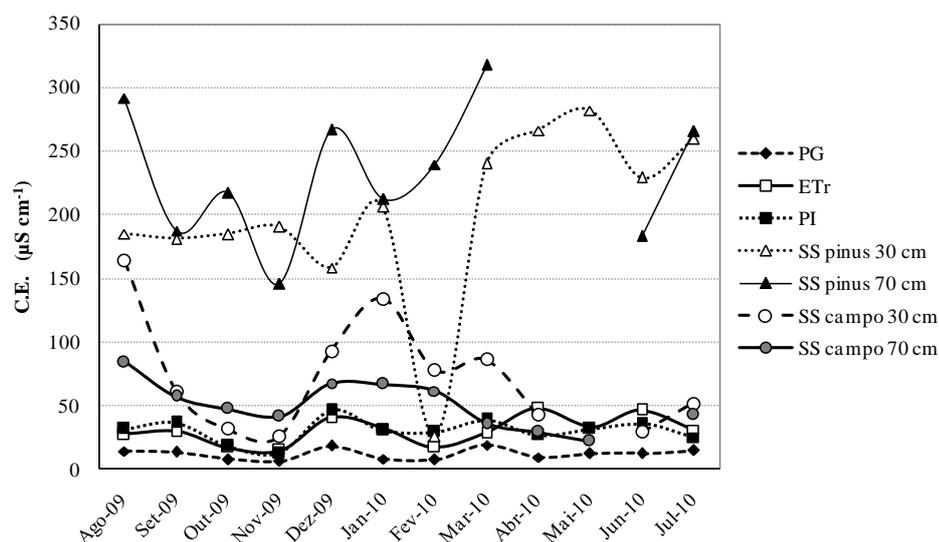


Figura 13 – Variação mensal da concentração de condutividade elétrica por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escorrimento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.

5.1.3 Aporte de Íons

A Tabela 8 apresenta a concentração dos elementos nos diferentes fluxos. Na precipitação global, o Ca^{2+} e o SO_4^{2-} foram o cátion e ânion dominantes, respectivamente. No escorrimento pelo tronco e precipitação interna, o K^+ e Cl^- foram o cátion e ânion dominantes. Na solução do solo nas duas profundidades e áreas estudadas, o Ca^{2+} foi o cátion mais abundante e o NO_3^- o ânion dominante.

Em geral, a solução do solo sob plantação de *Pinus taeda* apresentou as maiores concentrações para todos os elementos, sendo que para as duas profundidades a concentração de N-NO_3^- e Mg^{2+} foi significativamente ($p < 0,05$) maior que nos demais fluxos. Os íons Ca^{2+}

Na⁺ e Cl⁻ apresentaram os maiores valores na solução do solo sob plantação a 70 cm, e a concentração de K⁺ foi maior a 30 cm. As concentrações de SO₄²⁻ na solução do solo sob pinus e em área de campo a 30 cm de profundidade não apresentaram diferenças significativas. Já as concentrações de P-PO₄⁻ foram maiores nos fluxos de escoamento pelo tronco e precipitação interna. O nitrogênio na forma de NH₄⁺ foi o único dos elementos analisados que não apresentou diferenças significativas entre os diferentes fluxos, contudo as maiores médias foram observadas na solução do solo e a menor na precipitação global. A concentração do nitrito foi a mais baixa de todos os elementos analisados. Os resultados da análise da variância para a concentração dos elementos analisados nos diferentes fluxos podem ser observados no Apêndice B.

Tabela 8 – Concentração dos íons analisados em diferentes fluxos, no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.

Íons (mg l ⁻¹)	Fluxos						
	PG	PI	ETr	SS pinus 30 cm	SS pinus 70 cm	SS campo 30 cm	SS campo 70 cm
N-NH ₄ ⁺	0,10 a (0,08)	0,20 a (0,23)	0,28 a (0,38)	0,32 a (0,17)	0,33 a (0,26)	0,31 a (0,20)	0,19 a (0,18)
N-NO ₃ ⁻	0,15 c (0,04)	0,13 c (0,06)	0,16 c (0,06)	15,46 a (4,25)	17,10 a (3,06)	2,88 b (2,73)	2,17 b (1,45)
N-NO ₂ ⁻	0,02 bc (0,02)	0,02 bc (0,02)	0,01 c (0,01)	0,05 a (0,03)	0,05 a (0,03)	0,03 ab (0,02)	0,03 ab (0,02)
P-PO ₄ ⁻	0,10 c (0,04)	0,21 ab (0,10)	0,24 a (0,15)	0,14 bc (0,08)	0,13 bc (0,08)	0,10 c (0,05)	0,10 c (0,06)
K ⁺	0,17 d (0,07)	3,47 b (1,13)	3,70 b (1,22)	7,42 a (2,45)	3,62 b (0,85)	1,84 c (1,24)	0,83 cd (0,29)
Ca ²⁺	1,07 d (0,83)	1,79 d (1,32)	0,67 d (0,51)	20,93 b (6,25)	27,97 a (4,24)	6,51 c (4,24)	6,41 c (3,83)
Mg ²⁺	0,12 c (0,15)	0,67 bc (0,54)	0,11 c (0,15)	5,74 a (1,13)	5,55 a (1,00)	1,57 b (1,03)	0,99 bc (0,45)
SO ₄ ²⁻	0,42 c (0,19)	0,35 c (0,12)	0,31 c (0,14)	1,78 a (0,31)	1,86 a (1,48)	1,18 ab (0,38)	0,64 bc (0,34)
Na ⁺	0,18 c (0,12)	0,26 c (0,11)	0,29 c (0,51)	0,82 ab (0,23)	1,13 a (0,53)	0,44 bc (0,25)	0,43 bc (0,48)
Cl ⁻	0,32 e (0,15)	0,78 de (0,31)	0,87 de (0,52)	2,47 ab (0,90)	3,02 a (1,06)	1,78 bc (0,76)	1,50 cd (0,89)

PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escoamento pelo tronco;

SS pinus 30 cm= solução do solo plantação pinus a 30 cm de profundidade;

SS pinus 70 cm= solução do solo plantação pinus a 70 cm de profundidade.

SS campo 30 cm= solução do solo área de campo a 30 cm de profundidade;

SS campo 70 cm= solução do solo área de campo a 70 cm de profundidade;

Média e desvio padrão (entre parêntesis) dos 12 meses analisados;

Médias nas linhas com as mesmas letras não diferem entre si nos diferentes fluxos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Também Parfitt et al. (1997) encontraram um aumento de cátions trocáveis (Mg, K e Na) na solução do solo, após a conversão de pastagem para plantação de *Pinus radiata*, na Nova Zelândia. Segundo os autores, dois processos são os principais responsáveis pelo fenômeno. Primeiro, a ciclagem de nutrientes pelo pinus resulta na absorção de nutrientes de horizontes profundos do solo e seu posterior retorno à superfície via serapilheira e precipitação do dossel. Como as raízes dos pinus são distribuídas muito mais profundas no perfil do solo do que as raízes de gramíneas, os nutrientes podem ser retidos mais fortemente no ecossistema florestal. Em segundo lugar, o aumento da deposição seca pelo dossel da plantação resulta em maiores entradas de elementos. Para os autores, particularmente, o Na e Mg, juntamente com Cl e S, foram os íons que aumentaram sua concentração na solução do solo em plantação de *Pinus radiata*.

Na Holanda, De Vries et al. (1995) detectaram que os altos níveis de deposição atmosférica de S e N ocasionaram que na solução do solo predominasse SO_4 , NO_3 e Al. Eles também observaram que em parte dos sítios estudados a concentração de NO_3 na solução do solo excedeu o padrão europeu para água potável de 50 mg l^{-1} .

Nos fluxos estudados, a concentração de K^+ foi significativamente maior na solução do solo sob plantação de pinus na profundidade de 30 cm ($7,42 \text{ mg l}^{-1}$), seguida pela concentração do escorrimento pelo tronco ($3,70 \text{ mg l}^{-1}$), solução do solo a 70 cm de profundidade ($3,62 \text{ mg l}^{-1}$) e precipitação interna ($3,47 \text{ mg l}^{-1}$), que não se diferenciaram entre si. Esses valores de K^+ , significativamente maiores nos fluxos sob plantação de *Pinus taeda*, indicam uma circulação interna (lixiviação) desse elemento desde as copas das árvores e piso florestal (serapilheira) até a solução do solo. De acordo com Meurer (2006), o íon K^+ na solução do solo é a forma como as plantas absorvem esse nutriente, sendo que a quantidade de K^+ na solução necessária para o crescimento das plantas depende da espécie e do seu estado de crescimento, podendo variar de 1 a 50 mg l^{-1} ou mais, conforme as características dos solos. Também no presente estudo, destaca-se que o cálcio e o nitrato foram os nutrientes mais abundantes na solução do solo nas duas áreas e profundidades analisadas.

Na Figura 14, pode-se observar a distribuição mensal da concentração das 3 formas de nitrogênio analisadas nos diferentes fluxos. O nitrato foi a forma dominante de nitrogênio, com maior concentração na solução do solo sob plantio de pinus, nos 12 meses estudados, sendo que não se observou grande diferença entre as duas profundidades, mostrando que não houve lixiviação desse elemento. Já para amônio e nitrito, a distribuição apresentou uma flutuação variada para os meses e fluxos analisados.

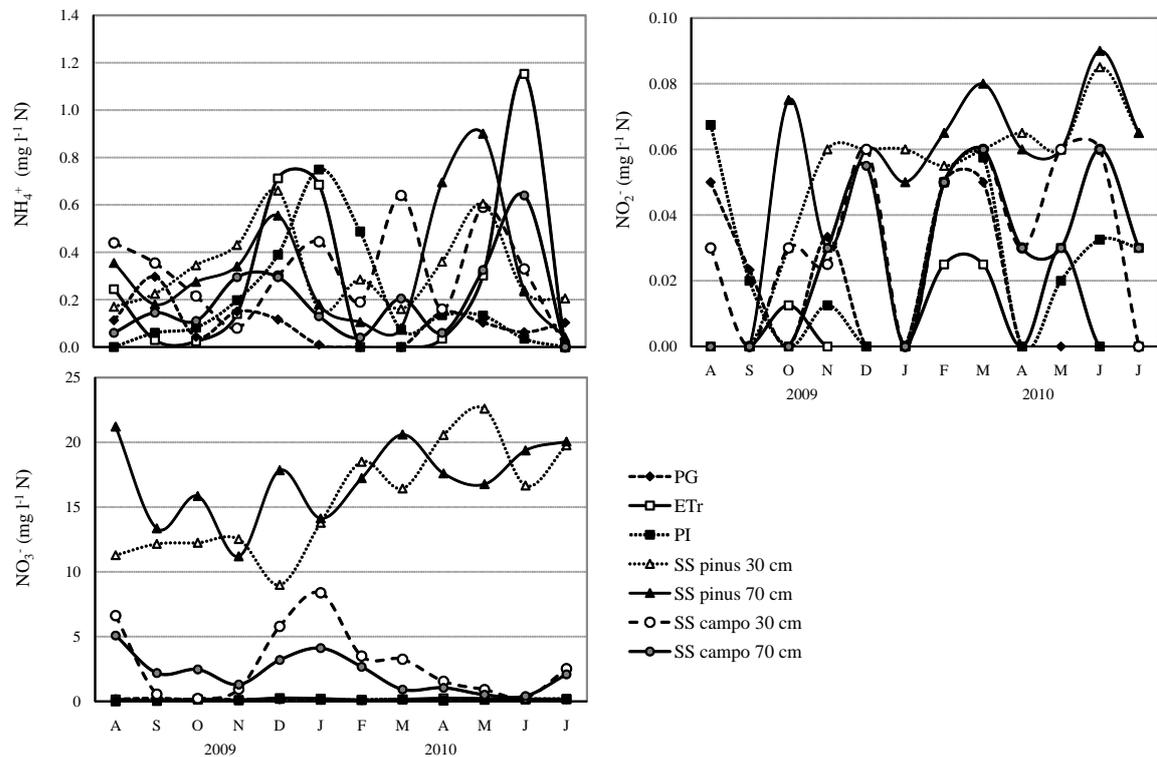


Figura 14 – Variação mensal da concentração de N nas formas de NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escorrimento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.

A Figura 15 mostra a variação mensal da concentração dos cátions básicos nos diferentes fluxos, onde se destacam o cálcio e o magnésio na solução do solo na plantação de pinus, com maiores valores todos os meses. Também a distribuição da concentração Ca^{2+} e Mg^{2+} , nos fluxos de precipitação interna e solução do solo na área de campo, apresenta correlação significativa (Tabela 9). Igualmente, Miranda et al. (2006) encontraram que as curvas de distribuição de magnésio na solução do solo foram semelhantes às curvas do cálcio. A concentração de K^+ alcançou um pico nos meses de fevereiro e março na solução do solo a 30 cm de profundidade. Para o Na^+ , os valores máximos ocorreram nos meses de abril, no escorrimento pelo tronco e solução do solo a 70 cm, e no mês de junho, na solução da área de campo a 30 cm.

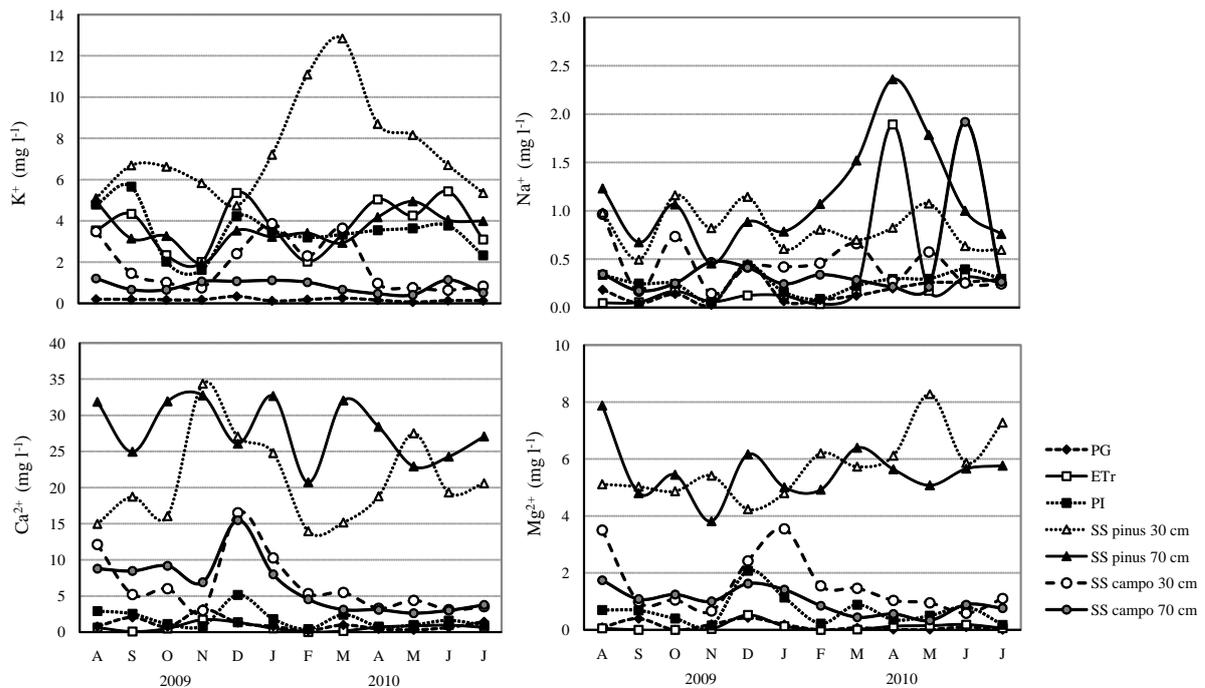


Figura 15 – Variação mensal da concentração dos cátions (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+) por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escorrimento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.

A Figura 16 mostra a variação mensal da concentração dos ânions analisados. Em geral, a concentração de fósforo na forma de PO_4^- em todos os fluxos foi baixa. Os maiores valores foram observados nos meses de dezembro e janeiro no escorrimento pelo tronco e precipitação interna. No entanto, passando as concentrações para a unidade de $\mu mol_c l^{-1}$, os valores médios variaram de 1 a 2,5 a $\mu mol_c l^{-1}$, o que segundo Araújo e Machado (2006), está dentro do intervalo das concentrações usuais de P nos solos cultivados ($1-10 \mu mol_c l^{-1}$). Segundo os autores, do teor total de P nos solos, apenas uma pequena fração está em formas disponíveis para as plantas. Já Calil (2008), no Sul do Rio Grande do Sul, analisou a solução do solo em três situações: em solo com eucalipto, campo nativo e em sistema agroflorestal, e em nenhuma situação o fósforo na forma de fosfato foi detectado em concentração significativa.

O SO_4^{2-} e o Cl^- tiveram a sua concentração máxima no mês de março na solução do solo a 70 cm sob plantação de pinus.

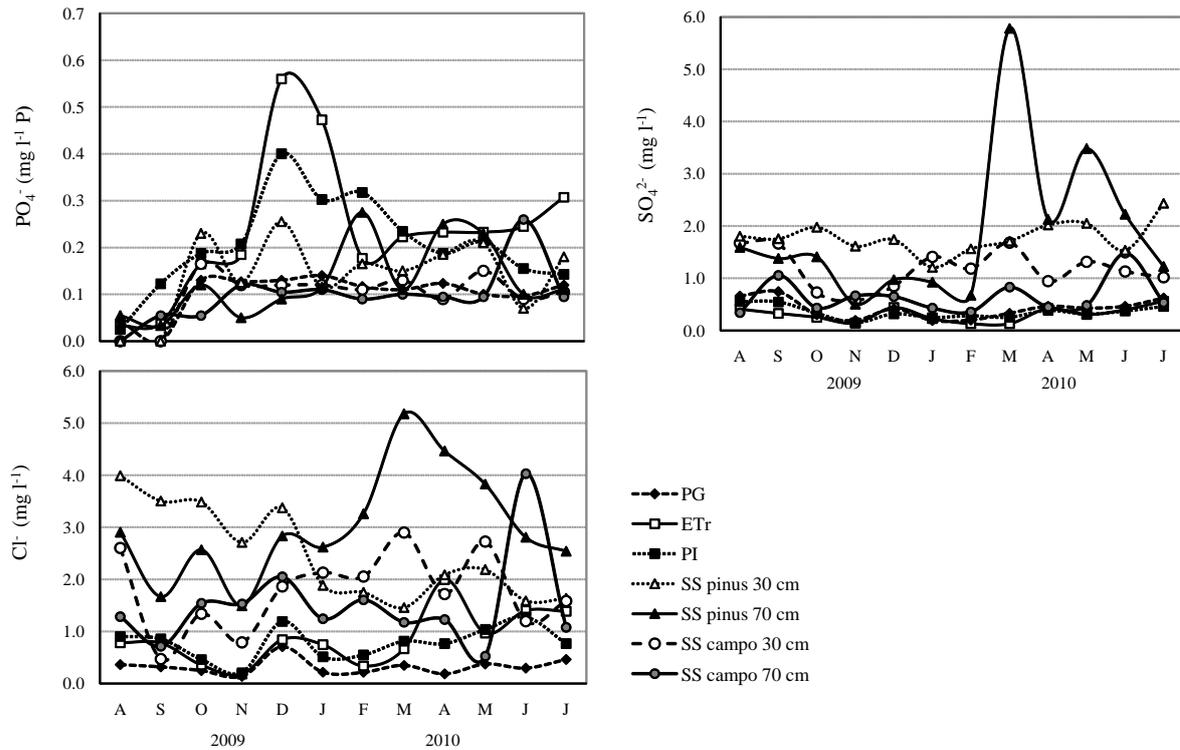


Figura 16 – Variação mensal da concentração dos ânions ($P-PO_4^{3-}$, SO_4^{2-} e Cl^-) por fluxo: PG= precipitação global; PI= precipitação interna; ETr= escorrimento pelo tronco; SS pinus 30 cm= solução do solo pinus a 30 cm de profundidade; SS pinus 70 cm= solução do solo pinus a 70 cm de prof.; SS campo 30 cm= solução do solo campo a 30 cm de prof. e SS campo 70 cm= solução do solo campo a 70 cm de prof.

A importante entrada via deposição atmosférica para Ca^{2+} , $N-NO_3^-$ e SO_4^{2-} é condizente com o tipo de uso de solo comum na região do estudo, ou seja, erosão eólica do solo, atividade pecuária e queima controlada de campos, sendo que as flutuações nas entradas por deposição atmosférica podem ter sido influenciadas pela intensidade destas atividades.

Laclau et al. (2003a), estudando a composição química da precipitação em ecossistemas no Congo, encontraram altas concentrações de $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, K^+ e SO_4^{2-} e mencionam que a presença desses elementos nas precipitações está geralmente associada com a queima de biomassa, enquanto as altas concentrações de cálcio estão associadas com a deposição de poeira. Também Vitti, Lima e Cicarone (2006) mencionam que o SO_2 da atmosfera, oriundo da queima de combustíveis fósseis, da madeira e de outros produtos orgânicos, é oxidado em parte a SO_4^{2-} e trazido ao solo pelas chuvas.

Na correlação entre os íons por tipo de fluxo (Tabela 9), pode-se observar um comportamento similar entre NO_3^- e Mg^{2+} em quase todos os fluxos. Outro comportamento

correlacionado positivamente foi Na^+ e Cl^- . O sódio e o cloro juntos formam o cloreto de sódio, que se origina da evaporação de águas superficiais que contêm o sal.

Tabela 9- Coeficiente de correlação de Pearson entre os elementos nos diferentes fluxos.

	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^-	SO_4^-	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^-	SO_4^-	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
Precipitação global (PG)										Precipitação interna (PI)									
NH_4^+	ns	0,66	-0,67	0,67	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,76	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NO_2^-	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NO_3^-		1	-0,77	0,73	ns	ns	ns	ns	0,63		1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PO_4^-			1	-0,76	ns	ns	ns	ns	ns			1	-0,67	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SO_4^-				1	ns	ns	ns	ns	ns				1	ns	ns	0,65	ns	ns	ns
Cl^-					1	0,83	ns	ns	ns					1	0,89	0,62	ns	ns	ns
Na^+						1	ns	ns	ns						1	ns	0,58	ns	ns
K^+							1	ns	0,58							1	ns	ns	ns
Ca^{2+}								1	ns								1	0,90	ns
Solução do solo no campo a 30 cm										Solução do solo no campo a 70 cm									
NH_4^+	ns	ns	ns	0,73	0,63	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,80	0,76	0,71	0,82	ns	ns	ns	ns
NO_2^-	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1	ns	0,63	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NO_3^-		1	ns	ns	ns	ns	0,85	0,78	0,96		1	-0,59	ns	ns	ns	ns	ns	0,64	0,85
PO_4^-			1	ns	ns	ns	ns	ns	ns			1	0,71	0,79	0,85	ns	ns	ns	ns
SO_4^-				1	ns	ns	0,60	ns	ns				1	0,63	0,76	ns	ns	ns	ns
Cl^-					1	0,71	0,59	ns	ns					1	0,94	ns	ns	ns	ns
Na^+						1	ns	ns	ns						1	ns	ns	ns	ns
K^+							1	0,64	0,84							1	ns	0,71	ns
Ca^{2+}								1	0,81								1	0,85	ns
Solução do solo pinus a 30 cm										Solução do solo pinus a 70 cm									
NH_4^+	ns	ns	0,64	ns	ns	0,70	ns	0,61	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,60	ns	ns	ns	ns
NO_2^-	1	ns	ns	ns	-0,80	ns	ns	ns	ns	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NO_3^-		1	ns	ns	-0,72	ns	ns	ns	0,91		1	ns	ns	0,60	ns	0,63	ns	0,85	ns
PO_4^-			1	ns	ns	ns	ns	ns	ns			1	ns	0,58	0,67	ns	ns	ns	ns
SO_4^-				1	ns	ns	ns	ns	ns				1	0,79	ns	ns	ns	ns	ns
Cl^-					1	ns	-0,59	ns	ns					1	0,84	ns	ns	ns	ns
Na^+						1	ns	ns	ns						1	ns	ns	ns	ns
K^+							1	ns	ns							1	ns	0,60	ns
Ca^{2+}								1	ns								1	ns	ns
Escoamento pelo tronco (ETr)																			
NH_4^+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,61	ns	0,65										
NO_2^-	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns										
NO_3^-		1	0,69	ns	ns	ns	ns	ns	0,67										
PO_4^-			1	ns	ns	ns	ns	ns	0,77										
SO_4^-				1	0,73	ns	ns	ns	ns										
Cl^-					1	0,77	0,71	ns	ns										
Na^+						1	ns	ns	ns										
K^+							1	ns	0,68										
Ca^{2+}								1	ns										

ns= não significativo a 5% de probabilidade de erro

Analisando a relação entre o volume de água da chuva (precipitação global) e a concentração dos elementos nos diferentes fluxos, observa-se (Tabela 10) que, com exceção do Ca^{2+} na precipitação global, que teve uma correlação positiva (maior volume de precipitação maior concentração de Ca^{2+}), as demais correlações significativas foram negativas. Igualmente, houve poucas correlações significativas (apenas 11% das possibilidades analisadas) e, provavelmente, isso se deve ao fato de que o clima da região não possui uma estação seca, o que poderia gerar maior acúmulo de deposição seca no dossel

florestal. Por exemplo, para lugares com uma estação seca definida, autores como Lilienfein et al. (2000) encontraram maior concentração de elementos na solução do solo no início da estação chuvosa.

Tabela 10 - Coeficiente de correlação de Pearson entre o volume de precipitação global (mm) e a concentração dos elementos (mg l^{-1}) nos diferentes fluxos.

mm	mg l^{-1}									
	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^-	SO_4^-	Cl ⁻	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Precipitação global (mm)	Precipitação global (PG)									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,62	ns
	Precipitação interna (PI)									
	ns	ns	ns	ns	ns	-0,86	-0,77	ns	ns	ns
	Escorrimento pelo tronco (ETr)									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,60	ns	ns
	Solução do solo no pinus a 30 cm									
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Solução do solo no pinus a 70 cm									
	ns	ns	ns	ns	-0,60	ns	ns	-0,66	ns	-0,67
Solução do solo no campo a 30 cm										
-0,58	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Solução do solo no campo a 70 cm										
ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

ns= não significativo a 5% de probabilidade de erro; n=12).

A Tabela 11 apresenta a concentração da soma dos cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) nos diferentes fluxos. Os cátions básicos refletem a fertilidade potencial do solo, pois são os mais comuns e trocáveis cátions no solo, que estão disponíveis e podem ser rapidamente absorvidos pelas plantas. Observa-se que, na solução do solo sob plantação de pinus, a concentração da soma de cátions básicos alcançou valores muito superiores (média das duas profundidades = $1026 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$), se comparada com os demais fluxos: solução do solo na área de campo, média para as duas profundidades ($267 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$), precipitação interna ($172 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$), escorrimento pelo tronco ($128 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$) e precipitação global na área de campo ($44 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$).

Tabela 11 – Concentração média em $\mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$ da soma de cátions básicos nos diferentes fluxos, período e sítios estudados.

Fluxos	Soma de cátions básicos (Ca^{2+} Mg^{2+} K^+ Na^+) $\mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$
Solução do solo no pinus a 70 cm	1068
Solução do solo no pinus a 30 cm	984
Solução do solo no campo a 30 cm	293
Solução do solo no campo a 70 cm	241
Precipitação interna (PI)	172
Escorrimento pelo tronco (ETr)	128
Precipitação global (PG)	44

Dessa maneira, esses resultados expressam a riqueza de nutrientes na forma de cátions trocáveis na solução do solo sob plantio de pinus. Valores comparados a outros ecossistemas florestais, por exemplo, concentrações catiônicas totais relatadas em soluções do solo em áreas não perturbadas de florestas nativas de eucalipto na Austrália, foram maiores que $1000 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$ (ADAMS e ATTIWILL, 1991), sendo esta uma concentração comum em áreas de florestas temperadas (LACLAU et al., 2003b).

Já Laclau et al. (2003b), estudando a ciclagem de nutrientes em plantação de eucalipto e em savana no Congo, detectaram que a característica geral da solução do solo nos dois ecossistemas estudados foi a pobreza em nutrientes, sendo que a concentração catiônica total nas soluções coletadas por lisímetros de tensão foi menor que $200 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$ ($< 60 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$ para a soma dos cátions básicos). Valores baixos também foram obtidos por Lilienfein et al. (2000), em solos de cerrado brasileiro (Oxisolos), onde a concentração dos cátions básicos em área de savana na solução do solo a 80 cm ficou entre $13\text{-}40 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$, e em área adjacente de *Pinus caribaea* Morelet, entre $22\text{-}59 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$. Os autores apresentam valores de diversos estudos, que mostram que a concentração da soma de cátions básicos na solução do solo para solos tropicais varia entre $45\text{-}229 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$, e para solos de clima temperado, entre $218\text{-}702 \mu\text{mol}_c \text{ l}^{-1}$.

Como a solução do solo pode ser influenciada pela entrada de elementos via precipitação interna, escoamento pelo tronco e mineralização da matéria orgânica, a retenção de partículas pelo dossel (deposição seca) e a ciclagem de nutrientes no povoamento de *Pinus*

taeda podem explicar a grande diferença existente entre a concentração da solução do solo sob vegetação de pinus e a solução da área de campo com predominância de gramíneas.

O fluxo anual de nutrientes estimado por hectare nos diferentes fluxos está descrito na Tabela 12, onde se observa que a taxa de fluxo na precipitação efetiva (precipitação interna + escoamento pelo tronco) mostra que a interação com a floresta causou redução na concentração de nitrato e sulfato, indicando uma possível absorção desses nutrientes diretamente pelo dossel. O nitrogênio na forma de nitrato e nitrito, assim como o sulfato, tiveram o fluxo de entrada pela água da chuva, e esse fluxo também foi a fonte principal de entrada para o sódio (92,0%) e o cálcio (82,9%). Por outro lado, o potássio teve seu fluxo de entrada quase exclusivamente originado pela precipitação efetiva, com 93,5%, sendo esta também o fluxo principal de entrada para o magnésio (74,7%).

Tabela 12 - Fluxo médio anual de nutrientes estimado para a precipitação global, precipitação interna e no escoamento pelo tronco na área estudada.

Fluxos	Lugar	Volume de água (mm)	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹									
			N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	P-PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺
Precipitação global (PG)	campo	2228	2,01	0,38	3,34	2,23	3,79	23,84	2,67	9,36	7,13	4,01
Precipitação interna (PI)	pinus	1559	3,12	0,37	2,03	3,27	54,09	28,06	10,44	5,46	12,16	4,05
Escoamento tronco (ETr)	pinus	105	0,29	0,01	0,18	0,25	3,90	0,70	0,12	0,33	0,91	0,30
Taxa fluxo efetivo na PE (PI+ETr) em %		-25	70	0	-34	58	1431	21	295	-38	83	9

A taxa de fluxo efetivo na PE (precipitação efetiva) foi calculada pelo seguinte método: TFE= (Fluxo PI+ETr)-(Fluxo PG)/(Fluxo PG).

Resultados semelhantes foram obtidos por Prakasa Rao et al. (1995), que estudando a química da precipitação global e interna em uma floresta tropical na Índia, descrevem que os elementos mais transferidos da vegetação para a precipitação interna foram o K⁺ (92%) e o Mg²⁺ (62%), e que a maior fonte de K⁺ e Mg²⁺ se formou pela lavagem da deposição na vegetação e pela lixiviação da vegetação. Segundo os autores, o máximo fluxo de K⁺ na precipitação interna é devido à lixiviação das copas, porque o K⁺ é o cátion mais biologicamente ativo.

O fluxo alto de Ca observado na precipitação global (23,84 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e precipitação interna (28,06 kg ha⁻¹ ano⁻¹) pode ser devido à geração de poeira originada pelo tráfego de veículos, já que os caminhos internos dos campos não estão pavimentados.

Scheer (2010) descreve que, para a Mata Atlântica no Sul do Brasil, aproximadamente 80% do Ca e Na e 57% do Mg tiveram sua entrada via precipitação global, enquanto para K (78%), a principal fonte de entrada foi a precipitação interna. O autor encontrou valores médios de entrada anual (em kg ha⁻¹) na precipitação interna para Na (90,6), K (29,1), Ca (7,1) e Mg (2,9), sendo que a maior entrada de nutrientes ocorreu na estação chuvosa. Segundo o autor, o fluxo para Na foi relativamente alto, ao passo que para K, Ca e Mg as entradas foram baixas, se comparadas com as de outras florestas tropicais e subtropicais.

Em plantação de *Pinus radiata* na Austrália, Crockford e Khanna (1997) verificaram valores de K para a precipitação interna de 10,9 kg ha⁻¹, de 1,05 kg ha⁻¹ no escoamento pelo tronco e de 6,7 kg ha⁻¹ na serapilheira produzida. Já para N total verificaram 2,47 kg ha⁻¹; 0,12 kg ha⁻¹ e 9,0 kg ha⁻¹ para precipitação interna, escoamento pelo tronco e serapilheira produzida, respectivamente.

Igualmente, Silva e Rodríguez (2001) encontraram valores de deposição média total (precipitação interna e global) para Ca de 27 kg ha⁻¹, na plantação de *Pinus pseudostrobus* Lindl., e de 36 kg ha⁻¹, em floresta mista de *Quercus* sp. e *Pinus pseudostrobus*. A deposição média na precipitação interna na floresta mista dos elementos K, Mg e Na foi de 23 kg ha⁻¹, 4 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, respectivamente. Já a contribuição da deposição de nutrientes pelo escoamento pelo tronco na floresta mista foi de 1,2 para Ca, de 1,1 para K e de 0,11 para Mg.

Dessa maneira, observa-se que os resultados das concentrações de nutrientes encontradas na área estudada são semelhantes aos de outros estudos, porém, a região se destaca com maiores concentrações para K⁺ e menor para Na⁺. Todavia, os estudos que encontraram elevadas concentrações de Na⁺ sofriam forte influência marítima.

5.2 Biomassa e nutrientes em plantação de *Pinus taeda*

5.2.1 Produção de biomassa

Os valores médios de diâmetro, altura e volume da biomassa seca das árvores de *Pinus taeda* e da serapilheira acumulada no solo, no povoamento de 13 anos de idade, estão representados na Tabela 13. Esses valores, bem como os valores dos coeficientes de variação e os de mínimo e máximo encontrados evidenciam a heterogeneidade existente no povoamento.

A análise dos valores obtidos nos diferentes compartimentos mostrou coeficientes de variação entre 6,9% para altura das árvores e 100,0% para o peso dos cones, indicando, com exceção da dimensão altura, alta variabilidade dos dados observados.

Tabela 13 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos para as variáveis dendrométricas e de biomassa seca individual (kg por árvore), obtidas em um povoamento de *Pinus taeda* de 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Variável	Média	Desvio padrão	CV(%)	Mínimo	Máximo
DAP (cm)	23,35	4,45	19,1	14,96	37,78
Altura (m)	20,96	1,44	6,9	16,60	24,00
Volume com casca (m ³)	0,40	0,15	37,5	0,15	0,61
Volume sem casca (m ³)	0,36	0,13	36,1	0,13	0,55
Acícula (kg)	13,20	5,90	44,7	6,90	25,70
Galho (kg)	30,80	13,70	44,5	15,70	53,80
Casca (kg)	12,70	5,40	42,5	8,40	25,20
Madeira (kg)	156,60	42,30	27,0	100,50	209,00
Cone (kg)	0,50	0,50	100,0	0,00	1,40
Raiz (kg em 7 m ⁻²)	36,10	6,00	16,6	31,90	43,00
Biomassa da copa (kg)	44,50	17,40	39,1	25,80	67,10
Biomassa acima do solo (kg)	214,10	61,80	28,9	140,80	299,60
Serapilheira acumulada solo (kg m ⁻²)	2,60	0,34	13,1	2,00	3,04

A biomassa seca estimada por hectare (Tabela 14) mostrou que 77% da biomassa do sítio ocorre acima do solo e que 56% da biomassa total corresponde à madeira, sendo a sequência decrescente da distribuição nos diferentes componentes a seguinte: madeira > raiz > galho > acícula > casca. Witschoreck (2008), em um povoamento de *Pinus taeda* com 17 anos de idade no Rio Grande do Sul, e Bizon (2005), para *Pinus taeda* nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, em povoamentos com idade média de 25 anos, encontraram resultados semelhantes, porém com maior porcentagem de casca do que acículas. Observando os resultados obtidos pelos autores, nota-se claramente que a porcentagem de madeira e casca aumenta com a idade. No caso da plantação de *Pinus taeda* com 17 anos, a madeira representou 59% da biomassa total e 62%, para os plantios com 25 anos de idade, com 7% e 6% de casca, respectivamente. Deve-se ressaltar, no entanto, que esses povoamentos tinham intervenções de desbaste.

Tabela 14 - Biomassa por hectare estimada para os diferentes componentes das árvores e serapilheira em um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Componente	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Biomassa relativa (%)		
		Total	Arbórea	Acima do solo
Acícula	15,82	5	5	6
Galho	36,98	11	12	14
Biomassa copa	53,72	16	17	21
Casca	15,15	4	5	6
Madeira	191,09	56	61	73
Biomassa acima do solo	261,32	77	84	100
Raiz	51,54	15	16	
Biomassa arbórea	312,87	92	100	
Serapilheira acumulada solo	26,03	8		
Biomassa total	338,89	100		

As raízes representaram o segundo maior percentual da biomassa das frações individuais da árvore (Tabela 14), contribuindo com 15% da biomassa total. Samuelson, Johnsen e Stokes (2004), em um povoamento de *Pinus taeda* de 6 anos de idade, nos Estados Unidos, relatam que a biomassa subterrânea variou de 22 a 25% da biomassa total. Já Witschoreck (2008), em um povoamento de *Pinus taeda* com 17 anos de idade no Rio Grande do Sul, encontrou uma proporção de 12,8% de raízes em relação à biomassa total. De acordo

com Gonçalves e Mello (2004), a alocação de carbono para as raízes é determinada em grande parte pela disponibilidade de água e nutrientes, sendo que em solos menos férteis, maior quantidade de fotoassimilados é destinada à formação de biomassa de raízes. Os autores citam o trabalho de Reis et al. (1985), que observaram, em povoamentos de *Eucalyptus grandis* W. Mill. ex Maiden, uma produção de biomassa de raízes muito superior (32% da biomassa total) em sítios de baixa fertilidade e com déficit de água, ao lado de 13% de biomassa de raízes para os sítios com melhor qualidade. Igualmente, Albaugh et al. (1998), em povoamento de *Pinus taeda*, reportaram que, na média de 3 anos de estudo, este apresentou uma porção de raízes em relação à biomassa total de 35% para o tratamento testemunha e de 23% para o tratamento com fertilização e irrigação. Constataram, dessa forma, que a aplicação de tratamentos silviculturais melhora a eficiência do crescimento da biomassa acima do solo e diminui a alocação para as raízes (ALBAUGH et al. 1998; SAMUELSON, JOHNSEN e STOKES, 2004).

A distribuição das raízes finas verificada no povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade resultou em 31%, computadas nos primeiros 10 cm de solo. Este é um resultado similar ao descrito por Lopes (2009), que encontrou uma concentração de 34,95% das raízes finas nos primeiros 10 cm de profundidade, em um povoamento de *Pinus taeda* com 15 anos de idade, no Rio Grande do Sul. Essa classificação diferenciada das raízes finas mostra a dinâmica e a importância da camada superficial do solo, pois as raízes finas são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes (GONÇALVES e MELLO, 2004).

Com relação à serapilheira, no presente estudo, a quantidade acumulada no solo representou 8% da biomassa total (26,03 Mg ha⁻¹), valor similar ao encontrado por Voigtlaender (2007) em povoamento de *Pinus taeda*, no Paraná, com 8 anos de idade (23,9 Mg ha⁻¹).

5.2.2 Elementos na biomassa

A concentração de elementos nos compartimentos da biomassa das árvores de *Pinus taeda* (Tabela 15) destaca que o elemento com menor variação foi o C, na madeira (CV= 0,7%), e com maior foi o Fe, na raiz (CV= 117,2%). O nitrogênio foi o macronutriente com maior concentração em todos os compartimentos, enquanto o P foi o de menor concentração. O Ca teve sua maior concentração na serapilheira acumulada no solo. A serapilheira também

foi o compartimento com maior concentração para todos os micronutrientes, com exceção do B, destacando uma alta concentração para o Fe e Mn. Também, de acordo com Reissmann e Wisniewski (2004), evidências indicam que a absorção de nutrientes diretamente da serapilheira representa um fluxo importante para atender a demanda nutricional das árvores.

A distribuição da concentração dos nutrientes analisados foi maior nas acículas e serapilheira e menor na madeira. Em geral, essa sequência coincide com a ordem decrescente do estoque de nutrientes na biomassa apresentada por Bellote e Silva (2004) e Rubilar, Allen e Kelting (2005): folha > casca > galho > madeira.

Tabela 15 – Média e coeficiente de variação da concentração de elementos nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Componentes	C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹							mg kg ⁻¹				
Acícula												
Média	461,6	13,9	1,0	4,7	3,1	1,3	0,8	20,0	5,1	81,0	448,8	35,1
CV%	5,5	9,1	10,1	12,9	20,6	14,1	23,5	15,4	16,8	10,4	26,6	24,5
Galho												
Média	429,8	4,1	0,3	1,8	2,1	0,6	0,4	6,7	5,3	46,8	145,0	18,1
CV%	13,0	23,5	36,4	33,4	8,7	21,5	21,1	20,6	44,7	11,7	23,7	24,7
Cone												
Média	468,2	9,7	1,1	5,9	0,3	0,7	0,7	15,5	7,4	51,9	43,9	26,3
CV%	1,3	30,7	33,4	31,7	18,9	16,3	29,5	48,3	23,5	23,7	4,9	24,5
Casca												
Média	468,2	5,4	0,3	2,1	1,7	0,8	0,5	13,2	4,4	79,2	86,2	25,3
CV%	4,5	27,5	28,2	33,2	38,2	33,8	30,8	19,3	15,8	49,8	39,0	53,9
Madeira												
Média	460,3	1,7	0,1	0,6	0,7	0,2	0,3	3,0	2,7	8,3	84,6	5,6
CV%	0,7	4,0	28,1	22,4	7,8	13,3	24,9	32,5	24,9	67,4	21,0	22,5
Raiz												
Média	472,0	9,0	0,4	2,0	3,9	1,0	0,7	17,9	11,8	2718,7	314,7	31,8
CV%	5,9	19,6	36,3	35,2	12,2	18,9	19,1	35,3	72,6	117,2	31,5	31,4
Serapilheira acumulada												
Média	404,5	10,6	0,5	1,0	5,0	1,3	0,6	16,0	23,0	7258,1	1019,2	46,8
CV%	10,3	14,6	34,1	17,8	15,5	11,3	7,2	15,8	36,5	32,5	19,0	16,3

Comparando os resultados atuais da concentração foliar de nutrientes (Tabela 15) com os encontrados no ano 2000 quando a plantação tinha 3 anos de idade, para os tratamentos sem fertilização, observa-se que os valores encontrados por Albaugh et al. (2010a) para os macronutrientes mais o boro foram muito similares: N (13,7 g kg⁻¹), P (1,0 g kg⁻¹), K (6,6 g

kg⁻¹), Ca (2,8 g kg⁻¹), Mg (0,7 g kg⁻¹), S (0,9 g kg⁻¹) e B (31,6 mg kg⁻¹). Com um intervalo de crescimento de 10 anos, a concentração foliar foi praticamente a mesma para N, P e S, superior para Ca e Mg e inferior para K e B.

Os nutrientes nas acículas tiveram a seguinte ordem decrescente de concentração: N > K > Ca > Mg > P > S > Mn > Fe > Zn > B > Cu. Os resultados dos macro e micronutrientes coincidem com a ordem dos nutrientes mais acumulados na matéria seca foliar para o gênero *Pinus* citada por Gonçalves (1995). Esses resultados da concentração foliar de nutrientes mostram que a maioria dos elementos está dentro da faixa de teores na matéria seca de folhas considerada adequada para plantas adultas de pinus, de acordo com a categorização de Gonçalves (1995), com exceção do S e Fe, que estão um pouco abaixo dos níveis adequados.

Também para *Pinus taeda*, no Sudeste dos Estados Unidos, Jokela (2004) recomenda níveis guias de nutrientes nas folhas e, segundo essa classificação, o P e o S são os que apresentam uma potencial limitação. Albaugh et al. (2010b) apresentaram a concentração foliar encontrada para uma rede regional de 110 ensaios com *Pinus taeda* no Sudeste dos Estados Unidos: N (11,4 g kg⁻¹), P (1,1 g kg⁻¹), K (4,2 g kg⁻¹), Ca (1,8 g kg⁻¹), Mg (1 g kg⁻¹), S (0,9 g kg⁻¹), B (10,4 mg kg⁻¹), Zn (37,3 mg kg⁻¹), Cu (3,1 mg kg⁻¹), Mn (344,5 mg kg⁻¹). Os valores médios foram semelhantes aos verificados para o presente estudo, onde se destaca maior concentração para o Ca (3,1 g kg⁻¹), B (20,0 mg kg⁻¹) e Mn (448,8 mg kg⁻¹).

A importância da concentração foliar de nutrientes está baseada no conceito de que as árvores, mais do que o solo, são o melhor indicador da disponibilidade de nutrientes, pois a análise foliar reflete, ao mesmo tempo, a disponibilidade de nutrientes no solo e o grau com que a planta é capaz de absorver esses nutrientes (BROCKLEY, 2001; TAIZ e ZEIGER, 2009). Um reflexo das boas condições nutricionais do sítio em questão, além do crescimento apresentado, é a não-resposta do povoamento à fertilização, fato verificado com os resultados do estudo de fertilização de meia rotação instalado na mesma área no ano 2000 (FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007).

No que se refere à concentração de carbono nos diferentes componentes da biomassa de pinus (Tabela 15), o seu conteúdo em relação à massa seca foi de: 46,2% (acículas), 43% (galhos), 46,8% (cones), 46,8% (casca), 46% (madeira), 47,2% (raízes) e 40,5% (serapilheira acumulada), representando, em geral, uma média de 45,2% de C na biomassa seca. Esses valores coincidem com resultados apresentados na literatura (SANQUETTA et al., 2001). Já a relação C/N, no mesmo material, apresentou os seguintes valores: 33,2 (acículas), 105,3 (galhos), 48,4 (cones), 87,1 (casca), 270,6 (madeira), 52,4 (raízes) e 38,1 (serapilheira acumulada). Observa-se que as acículas e a serapilheira acumulada no solo mostraram uma

relação C/N um pouco acima da relação considerada ótima para a decomposição da biomassa, que está entre 25 e 30. Com valores da relação C/N muito superiores a 25 ou 30, levará mais tempo para a biomassa se decompor, podendo ocorrer maior imobilização temporária de N e P pelos microorganismos, e conseqüentemente falta de N disponível no solo.

O estoque de elementos nos diferentes compartimentos por hectare (Tabela 16) apresentou a seguinte ordem decrescente de nutrientes: N > Ca > K > Fe > Mg > S > P > Mn > Zn > B > Cu. Deve-se ressaltar que a alta quantidade de Fe observada nas raízes e serapilheira acumulada pode estar relacionada à contaminação do solo nas amostras, já que são solos ricos em concreções de ferro-manganês.

A porcentagem do estoque (média de todos os nutrientes) esteve distribuída em 29% nas raízes, 23% na serapilheira acumulada no solo, 22% na madeira, 10% nas acículas, 10% nos galhos e 5% na casca. Observa-se que, quando se compara o conteúdo de nutrientes existente nas raízes mais a serapilheira (material que permanece no sítio depois da colheita convencional e que representa 23% da biomassa total), em geral (com exceção para o K e S), a quantidade de nutrientes é superior à existente na madeira mais a casca, material mais comumente exportado com a colheita e que representa 61% da biomassa total.

Tabela 16 - Estoque de elementos nos diferentes compartimentos da biomassa de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
kg ha ⁻¹												
Acícula	7302,0	219,7	15,3	74,2	49,0	20,1	13,0	0,3	0,1	1,3	7,1	0,6
Galho	15892,3	150,9	11,3	66,2	76,6	23,7	14,6	0,2	0,2	1,7	5,4	0,7
Biomassa copa	23194,4	370,6	26,6	140,4	125,6	43,8	27,7	0,6	0,3	3,0	12,5	1,2
Casca	7093,3	81,4	4,9	31,3	25,8	12,4	7,8	0,2	0,1	1,2	1,3	0,4
Madeira	87960,0	325,1	20,3	109,2	136,4	47,5	50,9	0,6	0,5	1,6	16,2	1,1
Biomassa acima do solo	118247,6	777,1	51,9	281,0	287,8	103,7	86,4	1,3	0,8	5,8	29,9	2,7
Raiz	24327,8	463,9	20,7	105,4	199,8	50,5	34,2	0,9	0,6	140,1	16,2	1,6
Biomassa arbórea	142575,4	1241,1	72,6	386,3	487,6	154,2	120,6	2,3	1,5	145,9	46,1	4,3
Serapilheira acumulada	10530,2	276,1	13,6	25,0	130,6	33,4	15,0	0,4	0,6	188,9	26,5	1,2
Biomassa total	153105,7	1517,1	86,2	411,3	618,2	187,6	135,7	2,7	2,1	334,9	72,7	5,5

Nesse sentido, quando se consideram os nutrientes acumulados na madeira e na casca, eles representam, de maneira geral, um terço dos nutrientes da biomassa total, mostrando que, de acordo com o manejo adotado, a exportação de nutrientes pode ser menor do que o estoque que permanece no sítio depois de um ciclo de crescimento de 13 anos. Também Oki (2002) ressalta que a retirada de nutrientes pode ser minimizada com formas adequadas de manejo. A autora encontrou para um ciclo de 26 anos, em um povoamento de *Pinus taeda*, no Paraná, valores similares ao presente estudo de distribuição de nutrientes na madeira e casca para N (487 kg ha⁻¹) e K (117,14 kg ha⁻¹), menores para P (5,80 kg ha⁻¹) e maiores para Ca (314,58 kg ha⁻¹), Mg (287,19 kg ha⁻¹) e S (202,44 kg ha⁻¹). Igualmente, Simpson, Osborne e Xu (1998) destacam para um plantio de *Pinus elliottii* Engelm., com 29,4 anos de idade na Austrália, que os resíduos da colheita, incluindo a serapilheira (46-71 Mg ha⁻¹), foram muito mais baixos que a madeira comercial removida (180-205 Mg ha⁻¹), mas que continham quantidades similares de nutrientes (com exceção para o potássio, do qual maiores quantidades foram removidas se comparadas com as que permaneceram no sítio), sugerindo que a maneira com que os resíduos são tratados seguramente tem um impacto significativo na produtividade do sítio a longo prazo.

O estoque de carbono, no povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, nos componentes, acículas, galhos, casca, madeira, raízes e serapilheira acumulada, foi de 7,3; 15,9; 7,1; 88,0; 24,3 e 10,5 Mg ha⁻¹, respectivamente. Considerando a biomassa total, o estoque de C é de 153,1 Mg ha⁻¹, o que representa uma taxa de fixação de 11,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Frangi et al. (2000), avaliando somente a biomassa aérea, verificaram que o povoamento de *Pinus taeda* com 20 anos de idade no Norte de Misiones, Argentina, acumulou 174 Mg ha⁻¹ de C, com uma média de 9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Também em Misiones, Pinazo et al. (2007) encontraram 212,37 Mg ha⁻¹ de C na biomassa total em plantio de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, para a densidade de 711 árvores ha⁻¹.

A Figura 17 mostra a distribuição relativa dos nutrientes na biomassa, onde se pode observar que as raízes e a madeira são os componentes principais de estoque de nutrientes. Na madeira isto se deve em decorrência da grande alocação de biomassa neste componente.

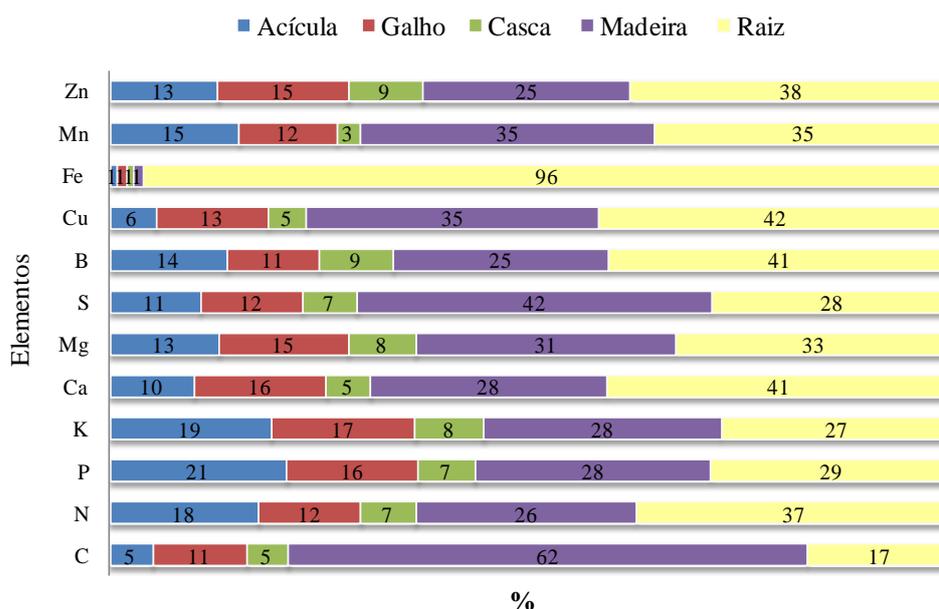


Figura 17- Distribuição relativa dos nutrientes nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

5.2.3 Elementos no solo

As propriedades físicas e químicas do solo na área em estudo podem ser observadas na Tabela 17. Os teores de elementos no solo verificados nas diferentes profundidades refletem, de acordo com Raij (1991) e Escobar et al. (1996), um pH em água com valores muito baixos, a matéria orgânica (MO) com valores médios, alta capacidade de troca cátions, baixa saturação por bases e média a alta saturação por alumínio, considerando sobretudo as camadas superficiais. Para Parfitt et al. (1997), alguns dos fatores que podem aumentar a acidificação do solo em plantios de pinus são a produção de ácidos orgânicos, captura pelo dossel da poluição ácida, aumento da decomposição da matéria orgânica, dissolução do S armazenado, mineralização e nitrificação do N, associados com a diminuição da matéria orgânica a partir dos centímetros superiores do solo mineral.

Também de acordo com Raij (1991) e com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), o valor para P é considerado muito baixo em todas as profundidades, já para K, Ca, Mg e Zn, os teores variam de alto a médio dependendo da profundidade e, para S, B e Cu, os valores de fertilidade do solo são altos.

Tabela 17 - Propriedades físicas e químicas do solo em diferentes profundidades, em um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Parâmetro	Profundidade do solo (cm)					
	5	15	30	50	70	90
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,09	1,16	1,20	1,37	1,37	1,33
MO (%)	3,3	2,9	2,5	1,9	1,3	1,0
pH (H_2O)	4,6	4,7	4,7	4,5	4,5	4,4
pH SMP	5,0	5,0	5,0	4,9	4,8	4,9
Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,7	1,6	1,5	2,9	3,5	3,2
H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	16,0	14,0	14,4	16,7	18,4	17,7
CTC efet. ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	9,5	8,7	8,7	6,6	6,8	5,8
CTC pH 7 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	23,8	21,1	21,5	20,4	21,8	20,4
Argila %	57	55	58	62	67	68
Textura	2	2	2	1	1	1
m (%)	17,9	17,9	19,8	44,4	50,9	54,0
V (%)	36,2	34,2	32,9	19,5	17,9	16,6
C orgânico (g kg^{-1})	24,3	20,7	17,6	15,6	10,2	7,9
N total (g kg^{-1})	1,9	1,6	1,3	1,1	0,8	0,7
P disponível (mg dm^{-3})	2,5	1,9	2,0	1,5	1,6	1,8
K trocável (mg dm^{-3})	135,0	77,7	84,3	70,0	92,3	87,7
Ca trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	5,5	5,1	5,0	2,5	2,2	1,8
Mg trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,9	1,9	1,9	1,1	0,9	0,6
S disponível (mg dm^{-3})	8,4	8,8	12,3	15,1	12,2	11,7
B disponível (mg dm^{-3})	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Cu disponível (mg dm^{-3})	4,1	4,5	4,5	4,2	3,2	2,8
Zn disponível (mg dm^{-3})	2,3	1,3	0,5	0,3	0,1	0,1

pH SMP (é um método de análise e correção de acidez do solo que se baseia no poder tampão do solo); Al (acidez trocável); H+Al (acidez potencial); m (saturação por Al); V (saturação por bases).

Os teores de elementos no horizonte A encontrados na área experimental pela Forest Nutrition Cooperative (2007), quando o povoamento de *Pinus taeda* tinha 3 anos de idade, foram os seguintes: C/N (13,6); C (3,06 %); N (0,23 %); P (7,2 mg dm^{-3}); K (41 mg dm^{-3}); Ca (2,09 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Mg (0,83 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Cu (5,9 mg dm^{-3}). Comparando os elementos encontrados quando a plantação estava na fase inicial de crescimento com os obtidos depois de 10 anos, verificou-se que o P disponível diminuiu consideravelmente e que também ocorreu um decréscimo para os níveis de C, N e Cu. No entanto, para K, Ca e Mg, os teores aumentaram. A relação C/N nos primeiros centímetros de solo baixou a 12,9, sendo a relação média nos primeiros 100 cm de profundidade de 13,2.

O estoque de nutrientes disponíveis (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob plantação de pinus pode ser visto na Tabela 18, onde se pode observar que o nitrogênio e os cátions básicos analisados (K, Ca e Mg) dominam o estoque em todas as profundidades, resultado similar ao encontrado para a solução do solo nesse local.

O estoque de carbono orgânico no solo até a profundidade de 100 cm foi estimado em $184,50 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor semelhante aos verificados no Rio Grande do Sul por Balbinot et al. (2000), em solo com plantio de *Pinus taeda* com 15 e 20 anos de idade, de $246,01$ e $189,69 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. Também no Rio Grande do Sul, Balbinot et al. (2003) estimaram $227,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono no solo, até a profundidade de 100 cm com plantio de *Pinus taeda* com 5 anos de idade. Segundo os autores, o elevado estoque de carbono é devido à preparação mínima do solo no momento do plantio e a presença da floresta como cobertura por intervalos longos de rotação, pois o estoque de carbono no solo é influenciado pelo tipo de uso da terra. Já em Misiones, Argentina, Frangi et al. (2000) obtiveram $83,54 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C no solo na profundidade de 0-50 cm, com plantio de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.

Tabela 18 - Estoque de carbono e nutrientes disponíveis em diferentes profundidades do solo, em um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Profundidade (cm)	C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
	kg ha^{-1}									
0-10	26487,7	205,8	2,7	147,4	1200,8	251,0	9,2	0,5	4,5	2,5
10-20	24066,8	185,8	2,2	90,2	1176,4	262,2	10,3	0,4	5,3	1,5
20-40	42150,9	304,4	4,7	201,7	2391,1	559,4	29,5	1,0	10,8	1,2
40-60	42794,2	294,7	4,2	191,6	1368,8	364,4	41,2	1,3	11,5	0,8
60-80	28017,8	212,0	4,3	252,8	1204,6	287,1	33,3	1,3	8,8	0,4
80-100	20982,1	177,8	4,9	233,9	960,6	204,5	31,2	1,3	7,5	0,3
Total	184499,6	1380,5	23,0	1117,5	8302,3	1928,5	154,7	5,8	48,3	6,6

Onde: N = fração disponível considerando 10% do nitrogênio total.

Frangi et al. (2000), estudando o conteúdo de nutrientes disponíveis em um solo vermelho profundo (*Ultisoles*) de uma plantação de *Pinus taeda* de 20 anos de idade, no Norte da província de Misiones, Argentina, encontraram valores maiores nos primeiros 10 cm para S ($169,2 \text{ kg ha}^{-1}$) e P ($12,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e menores para K ($82,1 \text{ kg ha}^{-1}$), Ca ($615,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e Mg ($65,4 \text{ kg ha}^{-1}$).

Hopmans e Elms (2009), estudando os nutrientes em plantio de *Pinus radiata* em solo arenoso na Austrália, concluíram que a produtividade foi mantida ou melhorada depois de

duas rotações, devido à conservação da matéria orgânica e dos resíduos da colheita. Os autores evidenciaram um declínio da concentração de C e N no perfil do solo durante a segunda rotação, no entanto, pouca ou nenhuma alteração foi observada nas concentrações de S, P, K, Ca e Mg.

5.2.4 Serapilheira produzida e nutrientes

A produção anual de serapilheira no povoamento de *Pinus taeda* estudado alcançou um valor máximo de 8.249 kg ha⁻¹ aos 8 anos de idade, estabilizando-se em torno de 6.400 kg ha⁻¹ a partir dos 9 anos (Figura 18). Resultados semelhantes aos verificados por Voigtlaender (2007), que encontrou uma deposição de acículas, para o período de um ano em *Pinus taeda* com 8 anos de idade no estado do Paraná, de 9.500 kg ha⁻¹. Para Misiones, Argentina, Perez et al. (2006), em plantações de 20 anos de idade de *Pinus taeda*, encontraram uma deposição de acículas de 9.520 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Também Reissmann e Wisniewski (2004) mencionam vários autores que estimaram a produção de serapilheira e relataram que os valores variam entre 6.400 a 9.300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para *Pinus taeda*. Contudo, a quantidade de serapilheira depende da idade do povoamento, da densidade do plantio e também das condições do sítio onde este se encontra estabelecido.

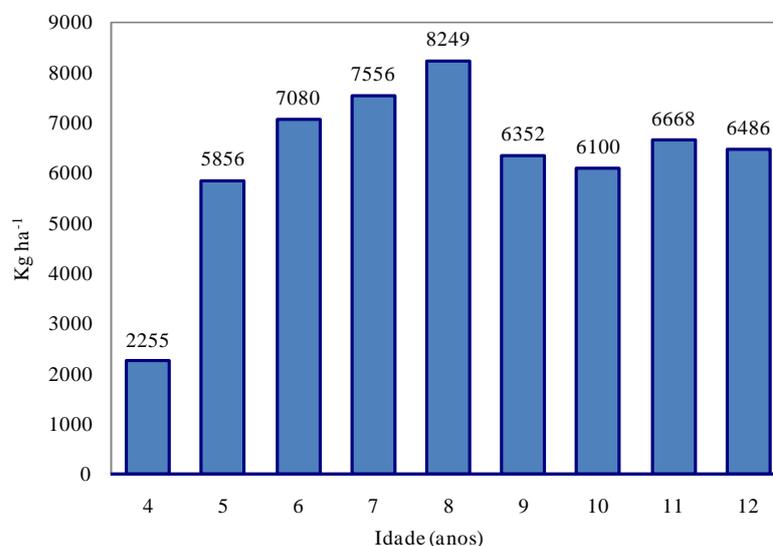


Figura 18 – Serapilheira produzida em diferentes idades em um povoamento de *Pinus taeda*, Corrientes, Argentina.

No presente estudo, a máxima de produção de serapilheira aos 8 anos de idade coincide com a idade a partir da qual o estoque de árvores começa a diminuir (Tabela 3), baixando a densidade pela mortalidade natural. Outro fator que está relacionado com a dinâmica da serapilheira é o índice de área foliar (IAF). O aumento no IAF maximiza a produtividade e, com o fechamento do dossel, ocorrem mudanças na altura de copa viva, havendo maior queda de acículas na base da copa (SAMUELSON; JOHNSEN e STOKES, 2004). A duração da área foliar foi estudada nesse mesmo povoamento de *Pinus taeda* por Albaugh et al. (2010a), que observaram um período de longevidade foliar de 2 anos, sendo um valor relativamente constante para a espécie.

A Figura 19 mostra a produção de serapilheira mensal (média de 10 anos), enquanto o Apêndice C apresenta a produção mensal para diferentes idades, onde se pode observar que a sazonalidade da produção de serapilheira indicou uma grande variação mensal nas distintas idades, uma ressalva é que na idade de 4 e 13 anos a coleta de dados não foi realizada todos os meses. Já na Figura 19 se pode observar que a média de 10 anos de estudo no povoamento de pinus (dos 4 aos 13 anos de idade) mostrou uma produção mensal com maior devolução no período (verão-outono) e menor (primavera-inverno), havendo uma correlação negativa significativa ($p < 0,01$, $n = 12$, $r = -0,51$) com a precipitação média mensal para o mesmo período. Por outro lado, a sazonalidade da deposição se mostrou fracamente correlacionada com a temperatura média mensal ($p < 0,01$, $n = 12$, $r = 0,25$). Estudos realizados no Brasil com *Pinus taeda*, por Koehler (1989) e Viera e Schumacher (2010), verificaram menor deposição da serapilheira no período (inverno-primavera). Já Perez et al. (2006), em plantação de *Pinus taeda* com 20 anos de idade na Argentina, encontraram um pico na deposição durante o inverno. Melo e Resck (2002), estudando a deposição de serapilheira em *Pinus caribaea* com 16 anos de idade, constataram que a maior queda de acículas ocorreu no período seco do ano. A maior deposição nos meses de menor precipitação e maiores temperaturas pode ser uma resposta fisiológica das árvores como mecanismo para controlar as perdas excessivas de água por transpiração.

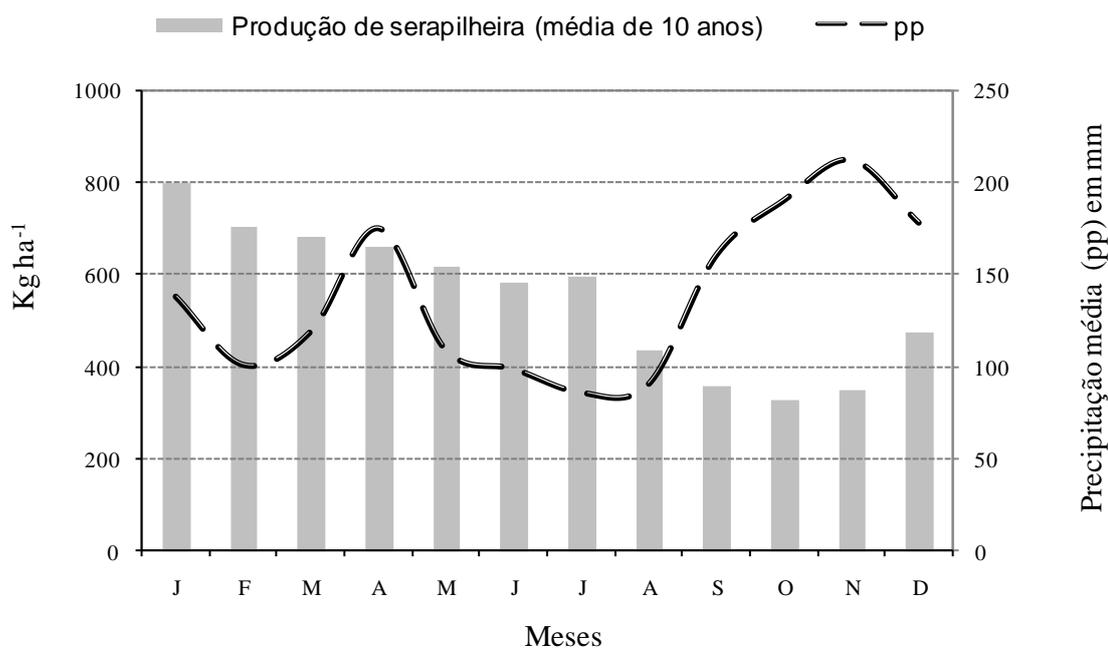


Figura 19 – Sazonalidade da serapilheira produzida, produção mensal média de 10 anos e precipitação média mensal (pp) para o período de (2001-2010) em um povoamento de *Pinus taeda*, Corrientes, Argentina.

A Tabela 19 apresenta os teores médios de nutrientes presentes na serapilheira produzida no período estudado. Entre os macronutrientes, o N e o Ca foram os que apresentaram maiores teores e, entre os micronutrientes, os maiores valores foram para Mn e o Fe. A distribuição mensal dos nutrientes pode ser visualizada no Apêndice D, onde se pode observar que as concentrações de N, P e K tiveram seus valores mínimos no inverno. Já para Ca, as concentrações tenderam a aumentar nesse período, resultados similares aos verificados por Perez et al. (2006), em plantação de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade. Também Finér (1996) verificou para *Pinus sylvestris* L. na Finlândia, que as concentrações de N, P e K foram mais baixas no outono e altas para Ca e Mn, possivelmente devido à variação na mobilidade dos elementos durante a senescência. Igualmente, para Viera e Schumacher (2010), os maiores teores de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* ocorreram durante os meses de maior pluviosidade e de menor deposição.

Tabela 19- Teores de nutrientes na serapilheira produzida no período de agosto de 2009 a julho de 2010 na área de estudo.

Nutriente	Média	CV%
N (g kg ⁻¹)	10,1	6,2
P (g kg ⁻¹)	0,6	9,0
K (g kg ⁻¹)	2,3	12,3
Ca (g kg ⁻¹)	4,3	6,9
Mg (g kg ⁻¹)	1,3	7,3
S (g kg ⁻¹)	0,7	4,4
B (mg kg ⁻¹)	22,8	8,9
Cu (mg kg ⁻¹)	6,4	30,1
Fe (mg kg ⁻¹)	158,0	9,2
Mn (mg kg ⁻¹)	583,6	6,9
Zn (mg kg ⁻¹)	35,5	12,8

Comparando os teores encontrados na serapilheira (composta principalmente por acículas senescentes) com os teores vistos nas acículas verdes da biomassa (Tabela 15), observa-se que as concentrações na serapilheira diminuíram para N, P e K, aumentaram para Ca, B, Cu, Fe e Mn e se mantiveram constantes para Mg, S e Zn. A variação verificada para os macronutrientes coincide com os resultados encontrados por Viera e Schumacher (2009), ao estudarem a variação na concentração de nutrientes com o aumento da idade das acículas de *Pinus taeda* em plantação de 7,5 anos de idade. Segundo os autores, esses resultados podem ser explicados pela mobilidade dos nutrientes. Por exemplo, elementos com maior mobilidade, como é o caso do P e K, apresentam teores superiores nas acículas jovens, comportamento inverso no caso do Ca, que é um elemento pouco móvel.

O estoque de nutrientes acumulado anualmente na serapilheira produzida (Tabela 20) apresenta as maiores quantidades para o N (72,3 kg ha⁻¹), seguido do Ca (33,7 kg ha⁻¹), K (16,7 kg ha⁻¹), Mg (10,0 kg ha⁻¹), S (5,2 kg ha⁻¹) e P (4,3 kg ha⁻¹), e dos micronutrientes, com valores de 4,43 kg ha⁻¹ para Mn, 1,12 kg ha⁻¹ para Fe, 0,26 kg ha⁻¹ para Zn, 0,17 kg ha⁻¹ para B e 0,04 kg ha⁻¹ para Cu.

Valores muito similares para os macronutrientes foram encontrados por Voigtlaender (2007) para *Pinus taeda*, com 8 anos de idade, no estado do Paraná: N (72,8 kg ha⁻¹), P (3,5 kg ha⁻¹), K (11,0 kg ha⁻¹), Ca (44,2 kg ha⁻¹) e Mg (7,9 kg ha⁻¹).

Tabela 20- Quantidade (kg ha⁻¹) de nutrientes acumulados mensalmente na serapilheira produzida em um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, na área estudada.

Período	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha ⁻¹										
Ago-09	4,13	0,25	0,42	1,87	0,41	0,28	0,01	0,006	0,17	0,31	0,02
Set-09	5,94	0,39	1,32	1,53	0,50	0,36	0,01	0,002	0,07	0,23	0,02
Out-09	3,20	0,23	0,87	0,78	0,29	0,17	0,01	0,001	0,04	0,12	0,01
Nov-09	8,79	0,59	2,03	2,49	0,81	0,55	0,01	0,004	0,11	0,38	0,03
Dez-09	5,76	0,36	1,30	2,15	0,69	0,46	0,02	0,002	0,07	0,32	0,02
Jan-10	9,91	0,59	2,39	3,70	1,18	0,74	0,03	0,002	0,11	0,50	0,03
Fev-10	5,92	0,33	1,75	2,62	0,90	0,38	0,02	0,003	0,07	0,31	0,02
Mar-10	5,43	0,32	1,26	2,39	0,78	0,33	0,01	0,012	0,06	0,29	0,02
Abr-10	6,65	0,38	2,01	4,17	1,34	0,50	0,02	0,003	0,10	0,50	0,03
Mai-10	5,18	0,28	1,37	3,37	0,95	0,39	0,01	0,004	0,08	0,37	0,02
Jun-10	5,82	0,30	1,17	4,46	1,14	0,52	0,01	0,003	0,12	0,57	0,03
Jul-10	5,57	0,30	0,79	4,14	1,04	0,49	0,01	0,002	0,12	0,52	0,02
Total anual	72,32	4,31	16,67	33,67	10,02	5,17	0,17	0,04	1,12	4,43	0,26

5.2.5 Exportação de nutrientes em função da intensidade de colheita

A Figura 20 apresenta a distribuição dos macronutrientes no povoamento de *Pinus taeda*. Observa-se que para K, Ca e Mg a maior porcentagem do estoque se encontra no solo. Enquanto que para o N e S se distribuem em torno a 50% no solo e outros 50% na biomassa, ressaltando que o N no solo está referido a 10% disponível para as plantas. Já o P apresenta um acúmulo 21,1% no solo e o restante na biomassa e serapilheira, mostrando a importância do manejo dos resíduos da colheita florestal para a incorporação deste elemento no solo.

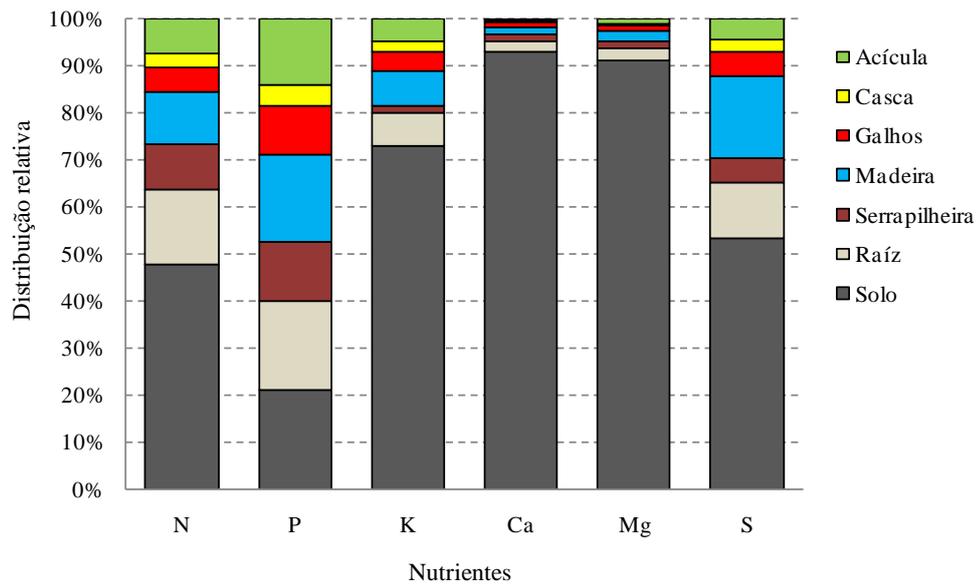


Figura 20- Distribuição relativa dos nutrientes em um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

Os resultados da Tabela 21 mostram que, quando se considerou como exportação de nutrientes somente a madeira (simulação 1), o balanço (diferença entre a entrada pela deposição atmosférica e a saída pela exportação da biomassa) foi positivo para P e Ca, mostrando que, para esses dois nutrientes, a entrada pela deposição atmosférica foi maior que a exportação somente da madeira. Observa-se que, quando o balanço nutricional foi positivo, ou seja, entrada maior de nutrientes via deposição do que saída através da colheita, o número de rotações (NR), simbolizado por “ ∞ ”, indica uma condição de sustentabilidade ou infinitos ciclos produtivos.

Na simulação 2 (colheita madeira + casca) o balanço segue positivo para Ca, e para os demais nutrientes acompanham a mesma tendência da simulação 1, porém com um estoque um pouco menor para todos os nutrientes analisados e com diminuição do número de rotações. Já na simulação 3 (colheita de toda biomassa acima do solo), o balanço foi negativo para todos os nutrientes, verificando-se também uma grande redução no número de rotações, passando a 3 para N, a 2 para P, a 5 para K, a 26 para Mg, a 4 rotações para S, e de infinitas a 175 para Ca, considerando os nutrientes na forma disponível para as plantas no momento da análise.

Tabela 21 - Balanço biogeoquímico dos macronutrientes e a estimativa do número de rotações (NR) para um povoamento de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, Corrientes, Argentina.

		N	P	K	Ca	Mg	S	
		Kg ha ⁻¹						
	Estoque (+) 1	Solo	1380,5*	23,0	1117,5	8302,3	1928,5	154,7
	Entrada (+) 2	Deposição atmosférica	57,3	22,3	37,9	238,6	26,7	30,9
Simulação 1	Colheita (-) 3	Madeira	325,1	20,3	109,2	136,4	47,5	50,9
	Resíduo (+) 4	Copa + raízes + casca + serapilheira	1192,0	65,9	302,1	418,8	140,1	84,8
		Balanço (2-3)	-267,7	2,0	-71,3	102,2	-20,8	-20
		NR (1+4)/(3-2)	10	∞	20	∞	99	12
Simulação 2	Colheita (-) 5	Madeira + casca	406,5	25,2	140,6	162,2	60,0	58,8
	Resíduo (+) 6	Copa + raízes + serapilheira	1110,6	60,9	270,8	456,1	127,7	76,9
		Balanço (2-5)	-349,2	-2,9	-102,6	76,4	-33,3	-27,8
		NR (1+6)/(5-2)	7	29	14	∞	62	8
Simulação 3	Colheita (-) 7	Toda biomassa acima do solo	777,1	51,9	281,0	287,8	103,7	86,4
		Raízes + serapilheira	740,0	34,3	130,4	330,4	83,9	49,3
	Resíduo (+) 8	Balanço (2-7)	-719,8	-29,5	-243,0	-49,2	-77,0	-55,5
		NR (1+8)/(7-2)	3	2	5	175	26	4

Balanço = diferença entre a entrada pela deposição atmosférica e a saída pela exportação da biomassa.

NR= (estoque disponível no solo + estoque resíduo)/(saída pela colheita – entrada deposição atmosférica).

∞ = infinitas rotações (condição de sustentabilidade).

*= 10% do N como disponível no solo.

Dessa forma, observa-se que quando se considera um sistema de colheita com retirada de toda biomassa arbórea acima do solo (madeira, casca, acículas e ramas), a entrada de nutrientes pela deposição atmosférica é insuficiente para evitar déficits de nutrientes pela exportação da biomassa.

Resultados semelhantes do número de rotações para N, P e K foram encontrados por Witschoreck (2008) para *Pinus taeda* com 17 anos de idade no Rio Grande do Sul: N (3), P (1), K (4), já para Ca e Mg foram obtidos um número muito menor de 8 e 6 rotações, respectivamente; e um número maior de rotações para S (7). Na prática, segundo o autor, a redução do número de rotações indica uma transição para um nível de produtividade menor.

Portanto, com o adequado manejo dos resíduos quando da colheita da plantação, pode-se manter um sistema sustentável e incorporar ao solo uma quantidade considerável de nutrientes, que são vitais para a manutenção da produtividade de futuras rotações.

6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo no povoamento de *Pinus taeda* com 12 e 13 anos de idade permitem concluir que:

- Da precipitação pluviométrica, 4,6% escorrem pelo tronco, 68,9% formam a precipitação interna e 26,5% são interceptados.

- Os principais íons presentes na água da chuva são N-NO_3^- , SO_4^{2-} , N-NO_2 , Na^+ e Ca^{2+} . Enquanto que a passagem da água da chuva pelas copas e troncos ocasiona a adição de vários elementos, principalmente de potássio e magnésio, pela lavagem da deposição seca e pela lixiviação dos tecidos das plantas. Desta maneira, as entradas de nutrientes por meio da deposição atmosférica e ciclagem interna, são uma importante fonte de reposição nos plantios florestais.

- A solução do solo sob plantação de pinus apresenta riqueza de íons, principalmente de cátions básicos trocáveis e de nitrogênio na forma de nitrato, em sua composição. Sendo que a concentração de elementos na solução do solo sob plantação de *Pinus taeda* apresenta valores muito superiores aos verificados na solução do solo sob área de campo.

- O principal estoque de nutrientes no povoamento de *Pinus taeda* se encontra na biomassa não comercial (acículas, galhos, raízes e serapilheira). Os nutrientes acumulados na madeira e na casca representam, de maneira geral, um terço dos nutrientes da biomassa total.

- Aos 13 anos de idade, o povoamento de *Pinus taeda* armazenou em sua biomassa $153,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono, representando uma taxa de fixação de $11,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que no solo o estoque de carbono até a profundidade de 100 cm é de $184,50 \text{ Mg ha}^{-1}$.

- A exportação de nutrientes aumenta consideravelmente se a prática de colheita florestal adotada for a retirada dos resíduos da biomassa arbórea acima do solo. E a manutenção de rotações sucessivas para a espécie diminui grandemente se os resíduos da biomassa arbórea acima do solo não permanecem no sítio no momento da colheita.

- Até o presente momento a plantação de *Pinus taeda* apresenta elevada produtividade na área estudada, não havendo evidências de restrições de recursos hídricos ou nutricionais. Indicando que em plantios florestais se pode alcançar um sistema produtivo mantendo a sustentabilidade do sítio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2009. Brasília. 2010. Disponível em: <(http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp)>. Acesso em: 1 de Setembro de 2010.

ADAMS, M.A.; ATTIWILL, P.M. Nutrient balances in forests of northern Tasmania. 2. Alteration of nutrient availability and soil-water chemistry as a result of logging. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 44, p.115–131, 1991.

ADEGBIDI, H. G. et al. Biomass development for intensively manager loblolly pine plantations growing on Spodosols in the Southern USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 167, p. 91-102, 2002.

ALBAUGH, J. M. et al. Characterization of foliar macro- and micronutrient concentrations and ratios in loblolly pine plantations in the southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 34, n. 2, p. 53-64, 2010b.

ALBAUGH, T. J. et al. Leaf area duration in natural range and exotic *Pinus taeda*. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 40, p. 224-234. 2010a.

ALBAUGH, T. J. et al. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 2, p. 317–328, 1998.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ANDREASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 291, p. 1-27, 2004.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. (eds). Washington D.C.: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF), 1998. 1220 p.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 253-280.

ATTIWILL, P. M. The chemical composition of rainwater in relation to cycling of nutrients in mature eucalyptus forest. **Plant and Soil**, The Hague, v. 24, n.3, 390-406, 1966.

BAEUMLER, R.; ZECH, W. Soil solution chemistry and impact of forest thinning in mountain forests in the Bavarian Alps. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.108, p. 231-238, 1998.

BAKER, T. G.; ATTIWILL, P. M. Fluxes of elements in rain passing through forest canopies in south-eastern Australia. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 4, p. 27-39, 1987.

BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n.1, p. 59-68. Jan/Jun 2003.

BALBINOT, R. et al. Quantificação do carbono orgânico em uma floresta de *Pinus taeda* na Região dos Campos de Cima da Serra, Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS, 6., 2000, Porto Seguro. **Resumos Técnicos...** Porto Seguro-BA, 2000.

BATTAGLIA, M. et al. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. **Tree Physiology**, Victoria, v.18, p. 521-528, 1998.

BELLOT, J.; ESCARRE, A. Contribución del quimismo del agua de lluvia, de la deposición seca y la lixiviación, sobre la química de los flujos de trascolación y escorrentía cortical en el encinar mediterráneo. **Options Méditerranéennes**, Série Séminaires, CIHEAM, Paris, n. 3, p. 211-214, 1989.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Sampling techniques and nutritional evaluations in eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 113-139.

BENYON, R. et al. Tree water use in forestry compared to other dry-land agricultural crops in the Victorian context: report prepared for the Department of Primary Industries Victoria to promote scientific knowledge in this area. **Ensis Technical Report 159**, Victoria, 2007. 50 p.

BHAT, S.; JACOBS, J. M.; BRYANT, M. L. The chemical composition of rainfall and throughfall in five forest communities: a case study in Fort Benning, Georgia. **Water, Air & Soil Pollution**, Berlin, versão *online*, outubro, 2010.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C.; BASHKIN, M. A. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 241-247, 2000.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.

BIZON, J. M. C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

BOXMAN, A. W.; PETERS, R. C. J. H.; ROELOFS, J. G. M. Long term changes in atmospheric N and S throughfall deposition and effects on soil solution chemistry in a Scots pine forest in the Netherlands. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 156, p. 1252-1259, 2008.

BROCKLEY, R. P. Foliar analysis as a planning tool for operational fertilization. **Proceedings of Enhanced Forest Management: Fertilization and Economics Conference**, Alberta, p. 62–67, 2001. Disponível em: <http://www.for.gov.bc.ca/hre/standman/docs/10Brockley.pdf>. Acessado em: 28/06/2010.

BROWN, A. E. et al. A review of paired catchment studies for determining change in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 310, p. 28-61, 2005.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55 p. (Forest Paper, 134).

CABRERA, A. L. **Regiones Fitogeográficas Argentinas**. 2. ed. Buenos Aires: Encic. Arg. de Agricultura y Jardinería, 1976. Tomo II. Fasc. 1: 1-85 pág.

CALDER, I. R. et al. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. **Unasyuva**, Roma, v. 58, n. 229, p. 3-10, 2007.

CALDER, I.R. Water use of eucalypts—a review with special reference to South India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.11, p. 333–342, 1986.

CALIL, F. N. **Aspectos nutricionais de um sistema agroflorestal com eucalipto no sul do Rio Grande do Sul, Brasil**. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CÂMARA, C. D.; LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Critérios e indicadores hidrológicos de monitoramento em microbacias. p. 107-140. In: LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. (Org.). **As plantações florestais e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: RiMa, 2006.

CANNELL, M. G. R. Environmental impacts of forest monocultures: water use, acidification, wildlife conservation, and carbon storage. **New Forests**, Dordrecht, v. 17, p. 239-262, 1999.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM. Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88 p.

CARNEVALLI, R. **Fitogeografía de la Provincia de Corrientes**. Corrientes: Gobierno de la Provincia de Corrientes, e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1994. 324 p.

CÁTEDRA DE CLIMATOLOGÍA AGRÍCOLA. Universidad Nacional de Entre Ríos - Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2009. Disponível em: <<http://www.cicytpp.org.ar/climatologiafca/docencia/apuntes/tema8.pdf>> (Acesso em: 2 de Abril de 2010).

CHANG, M. **Forest hydrology: an introduction to water and forests**. 2. ed. New York: Taylor & Francis, 2006. 474 p.

CHUYONG, G.B.; NEWBERY, D.M.; SONGWE, N.C. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 67, p. 73-91, 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.

CROCKFORD, R. H.; KHANNA, P. K. Chemistry of throughfall, stemflow and litterfall in fertilized and irrigated *Pinus radiata*. **Hydrological Processes**, New Jersey, v. 11, p. 1493-1507, 1997.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, New Jersey, v. 14, p. 2903-2920, 2000.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P.; SAGEMAN, R. Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia: 3. Stemflow and total inputs. **Hydrological Processes**, New Jersey, v.10, p. 25-42, 1996.

CUBBAGE, F. et al. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. **New Forests**, Dordrecht, v. 28, p. 237-255, 2007.

DE VRIES, W. et al. Impacts of acid deposition on concentrations and fluxes of solutes in acid sandy forest soils in The Netherlands. **Geoderma**, Amsterdam, v, 67, p. 17-43, 1995.

DEWAR, R. C.; McMURTRIE, R. E. Sustainable stemwood yield in relation to the nitrogen balance of forest plantations: a model analysis, **Tree Physiology**, Victoria, v. 16, p.173-182, 1996.

DEZZEO, N.; CHACÓN, N. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 234, p. 218-226, 2006.

EATON, J. S.; LIKENS, G. E.; BORMANN, F. H. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. **Journal of Ecology**, London, v. 61, n. 2, p. 495-508, Jul. 1973.

ELIZONDO, M. H.; MESTRES, J. M. **Primer inventario forestal de la provincia de Corrientes**: metodología, trabajo de campo y resultados. Corrientes, Argentina: Consejo Federal de Inversiones, Gobierno de Corrientes, 2009. 66 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.

ESCOBAR, J. et al. **Mapa de suelos de la provincia de Corrientes**. Corrientes, Argentina: Gobierno de la provincia de Corrientes, e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1996. 429 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global planted forests thematic study: results and analysis, by Del Lungo, A.; Ball, J.; Carle, J. **Planted Forests and Trees**. Working Paper 38. Rome, 2006. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/site/10368/en>>. Acesso em: 2 de Agosto de 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **State of World's Forests 2007**. Rome: FAO, 2007. 144 p.

FASSOLA, H. E. et al. Estimación del volumen con corteza en *Pinus taeda* L. implantado en la zona NE de Corrientes – S de Misiones, Argentina. In: JORNADAS TÉCNICAS FORESTALES Y AMBIENTALES, 12., 2006, Eldorado. **Anales...** Eldorado: Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA, 2006.

FASSOLA, H. E. et al. Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para Misiones y NE de Corrientes, Argentina. In: JORNADAS TÉCNICAS FORESTALES Y AMBIENTALES, 14., 2010, Eldorado. **Anais...** Eldorado: Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA, 2010.

FINÉR, L. Variation in the amount and quality of litterfall in a *Pinus sylvestris* L. stand growing on a bog. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, p. 1-11, 1996.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

FOREST NUTRITION COOPERATIVE. **Responses to nutrient additions in young loblolly pine plantations: Regionwide 18 Eighth Report**. Raleigh: FNC, Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, 2007, 36 p. (Bulletin, 60).

FOX, T. R. et al. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern united states. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 31, n. 1, p. 5-11, 2007.

FRANGI, J. L. et al. **Ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* en el norte de la provincia de Misiones**. La Plata: Proyecto Forestal de Desarrollo SAGPYA – BIRF. LISEA/UNLP/EEA Montecarlo, Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de La Plata, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA-EEA- Montecarlo. Informe Final, 2000. 63 p.

GIARDINA, C. P., RYAN, M.G., BINKLEY, D. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p. 1438–1450, 2003.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue Management practices In: NAMBIAR, E.K.S. (ed.) **Site management and productivity in tropical plantation forests: workshop proceedings**, 22-26 November,

2004, Piracicaba, Brazil, and 6-9 November, Bogor, Indonesia, p. 51-62. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia. 2008.

GONÇALVES, J. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 15, p. 1- 23, 1995.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. The root system of trees. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 223 – 267.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.25, n.3, p.601-616, 2001.

GOOGLE EARTH. Imagem da área do estudo, 2005. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 12 de Dezembro 2009.

HAMILTON, L.S. **Forests and water** – Thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005, Roma. FAO Forestry paper, v. 155, 2008. 78 p.

HOPMANS, P.; ELMS, S. R. Changes in total carbon and nutrients in soil profiles and accumulation in biomass after a 30-year rotation of *Pinus radiata* on podzolized sands: impacts of intensive harvesting on soil resources. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 2183-2193, 2009.

HUBER, A.; IROUM, A.; BATHURST, J. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. **Hydrological Processes**, New Jersey, v. 22, p. 142–148, 2008.

JOKELA, E. J. Nutrient management of southern pines. In: DICKENS, E. D., BARNETT, J. P.; HUBBARD, W. G.; JOKELA, E. J. (eds.) **Slash pine: still growing and growing! Proceedings of the slash pine symposium**. Asheville, NC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 2004, 148 p. p. 27–35.

KANE, E. S. et al. Precipitation control over inorganic nitrogen import–export budgets across watersheds: a synthesis of long-term ecological research. **Ecohydrology**, New York, v.1, p.105-117, 2008.

KEENAN, R. J. et al. **Plantations and Water:** plantation impacts on stream flow. Canberra: Science for Decision Makers. Australian Government. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. Bureau of Rural Sciences. 2006. 8 p. Disponível em:

<(http://www.acera.unimelb.edu.au/materials/brochures/SDM-PlantationsWater)>. Acesso em: 16 de abril 2009.

KOEHLER, W. C. **Varição estacional de deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa-PR**. Curitiba: UFPR, 1989. 138p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Paraná, 1989.

LACLAU, J. P. et al. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo 1. Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, p. 105–119, 2003a.

LACLAU, J. P. et al. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo 2. Chemical composition of soil solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 180, p. 527–544, 2003b.

LACLAU, J.P. et al. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 3. Input–output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 375-391, 2005.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima, 2006. 531 p.

LEVIA, D. F. Jr.; FROST, E. E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 274, p. 1-29, 2003.

LILIENFEIN, J. et al. Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna oxisols. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p.145–157, 2000.

LIMA, W. P. A busca do manejo sustentável de florestas plantadas. In: LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. (Org.). **As florestas plantadas e a água**: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: RiMa. 2006. 226 p. p. 29-43.

LIMA, W. P. Ação das chuvas no ciclo biogeoquímico de nutrientes em plantações de pinheiros tropicais e em cerradão. **IPEF**, Piracicaba, n.30, p.13-17, Ago. 1985.

LIMA, W. P. Interceptação da chuva em povoamentos de eucalipto e de pinheiro. **IPEF**, Piracicaba, n.13, p. 75-90, 1976.

LIMA, W. P.; BARBIN, D. Efeito de plantações de *Eucalyptus* e *Pinus* sobre a qualidade da água da chuva. **IPEF**, Piracicaba, n.11, p. 23-35, 1975.

LINDBERG, S. E. et al. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. **Science**, Washington, DC., v. 231, p. 141-145, 1986.

LIU, W.; FOX, J. E. D.; XU, Z. Nutrient fluxes in bulk precipitation, throughfall and stemflow in montane subtropical moist forest on Ailao Mountains in Yunnan, south-west China. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 18, p. 527-548, 2002.

LLORENS, P. et al. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.199, p. 331-345, 1997.

LLORENS, P.; DOMINGO, F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 335, p. 37-54, 2007.

LOPES, V. G. **Quantificação das raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L., na região dos Campos de Cima da Serra, RS.** 2009. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

LOPES, V. G.; SCHUMACHER, M. V. Dinâmica da precipitação em um povoamento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 6., SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RIO DE JANEIRO, 2., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SIMADERJ, 2010. ISSN 1984-1310.

LOPES, V. G.; SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. Aporte de nutrientes via precipitação em um povoamento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 6., SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RIO DE JANEIRO, 2., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SIMADERJ, 2010. ISSN 1984-1310.

MARIN, C. T.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 237, n.1, p.40-57, 2000.

MARQUES, R.; RANGER, J. Nutrient dynamics in a chronosequence of douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) France) stands on the Beaujolais Mounts (France). 1:

Qualitative approach. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 91, p. 255–277, 1997.

MELO, J. T.; RESCK, D. V. S. **Retorno, ao solo, de nutrientes de serapilheira de pinus no cerrado do Distrito Federal**. Planantina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 18p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento n. 75).

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 281–298.

MIRANDA, J. et al. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 633-647, 2006.

MIYAZAWA, M. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. Cap. 4, p. 171-224.

MORENO, G.M.; GALLARDO, J.F. L. Atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pyrenaica* forests: implications for forest nutrition. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 171, p. 17-19, 2002.

MOURA, A. E. S. S. et al. Intercepção das chuvas em um fragmento de floresta da mata atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n.3, p. 461-469, 2009.

OKI, V. K. **Impactos da colheita de *Pinus taeda* sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias**. 2002. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

ORA - Oficina de Riesgo Agropecuario; SAGPYA - Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. **Riesgo y Seguro en el Sector Forestal**. 2007. Disponível em: <(www.ora.gov.ar/archivos/riesgoysseguroforestal.pdf)>. Acesso em: 3 de Agosto de 2010.

PALLARDY, S. G. **Physiology of wood plants**. 3. ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press. 2008. 454 p.

PARFITT, R. L. et al. Soil and solution chemistry under pasture and radiata pine in New Zealand. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 191, p. 279–290, 1997.

PARKER, G. G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. **Advances in Ecological Research**, Great Britain, v. 13, p.57–133, 1983.

PEREZ, C. A. et al. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. **Iterciencia**, Caracas, v.31, p. 794-801, 2006.

PINAZO, M. A. et al. Efectos de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. establecida sobre Ultisoles de Misiones. **RIA**, INTA, Argentina, v. 36, p. 5-20, 2007.

POGGIANI, F. et al. Exportação de biomassa e nutrientes através da exportação de troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, v. 25, p. 37 - 39, 1983.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M. V. Nutrient cycling in native forest. In: GONÇALVES, J.L.M; BENEDETTI, V. **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 285 – 305.

PRAKASA RAO, P. S. et al. Rain water and throughfall chemistry in the Silent Valley forest in South India. **Atmospheric Environment**, Great Britain, v. 29, p. 2025-2029, 1995.

PRITCHETT, W. L. **Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento**. México: Limusa Noriega, 1990. 634 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.

RANGER, J.; MARQUES, R.; JUSSY, J. H. Forest soil dynamics during stand development assessed by lysimeter and centrifuge solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.144, p. 129-145, 2001.

REIS, M. G. F. et al. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, p. 149-162, 1985.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Nutritional aspects of pine plantations. In: GONÇALVES, J. L.M.; BENEDETTI, V. **Forest Nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 140– 170.

RUBILAR, R. A.; ALLEN, H. L.; KELTING, D. L. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on an upper coastal plain site. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 28, p. 548-564, 2005.

SAMUELSON, L. J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management . **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.192, p. 59-70, 2004.

SANQUETTA, C.R. et al. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 2, 2001, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM. PPGEF, 2001.

SAS (**Statistical analysis system**). SAS software versão 6.08. SAS Institute Inc., Cary, NC. 1993.

SCHEER, M. B. Mineral nutrient fluxes in rainfall and throughfall in a lowland Atlantic rainforest in southern Brazil. **Journal Forest Research**, Berlin, v. 16, p. 76-81, 2010.

SCHULTZ, R. **Loblolly pine**: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). USDA Agricultural Handbook 713. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1997.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (labillardière) sub-espécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.45-53, 2001.

SILVA, I. C.; RODRÍGUEZ, H. G. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. **Tree Physiology**, Victoria, v. 21, p. 1009-1013, 2001.

SIMPSON, J. A.; OSBORNE, D. O.; XU, Z. H. Pine plantations on the coastal lowlands of subtropical Queensland, Australia. In: NAMBIAR, E.K.S.; COSSALTER, C.; TIARKS, A. (eds.) **Site management and productivity in tropical plantation forests: workshop proceedings**. Pietermaritzburg: CIFOR (Center for International Forestry Research). 1998. 75 p. p. 61-67.

SMETHURST, P. J. Soil solution and other soil analyses as indicators of nutrient supply: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.138, p.397-411, 2000.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 253, p. 130-147, 2001.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 215– 252.

SOUZA, V. V. et al. Análise da qualidade da água das precipitações em aberto e efetiva em um fragmento secundário da Mata Atlântica, no município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.4, p. 737-743, 2007.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; JACOB, W. S. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in *Eucalyptus* plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, p. 358-362, 2006.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 920-930, 2008.

SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. **Soil Science Society of America**, Madison, v.36, p.143-147, 1972.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. (trad.) SANTARÉM, E. R. et al. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

TIARKS, A.; RANGER, J. Soil properties in tropical plantation Forests: evaluation and effects of site management: a summary. In: NAMBIAR, E.K.S. (ed.) **Site management and productivity in tropical plantation forests: workshop proceedings**. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research, 2008. p. 191-204

USDA (United States Department of Agriculture). **Soil Taxonomy** – a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2. ed., Washington, DC: USDA, 1999. 870 p.

UYTTENDAELE, G. Y. P.; IROUMÉ A. The solute budget of a forest catchment and solute fluxes within a *Pinus radiata* and a secondary native forest site, southern Chile. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2521-2536, 2002.

VAN DIJK, A. I. J. M. Reforestation, water availability and stream salinity: a multi-scale analysis in the Murray-Darling Basin, Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 251, p. 94-109, 2007.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 251, p. 1-9, 2007.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **R. Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.85-94, 2010.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 375-382, Out.-Dez. 2009.

VINCKE, C.; THIRY, Y. Water table is a relevant source for water uptake by a scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand: evidences from continuous evapotranspiration and water table monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1419-1432, 2008.

VITOUSEK, P. M. et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. **Ecological Applications**, New York, v. 7, n. 3, p. 737-750, 1997.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 299-325.

VOIGTLAENDER, M. **Caracterização hidrológica e biogeoquímica de microbacias: uma comparação entre Mata Atlântica e *Pinus taeda* L.** 2007. 74f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

VOSE, J. M.; ALLEN, H. L. Leaf area, stemwood growth, and nutrition relationships in loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 34, n. 3, p.547-563, 1988.

WALLACE, J.S. Calculating evaporation: resistance to factors. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 73, p. 353-366, 1995.

WESTMAN, W. E. Inputs and cycling of mineral nutrients in a coastal sub-tropical eucalypt forest. **Journal of Ecology**, London, v. 66, n.2, p. 513-531, Jul. 1978.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 113-140, 2004.

WIKIPEDIA. Mapas de Corrientes e do Departamento de Santo Tomé. Disponível em: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Provincia_de_Corrientes_\(Argentina\).svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Provincia_de_Corrientes_(Argentina).svg)>. Acesso em: 29 de Julho 2010.

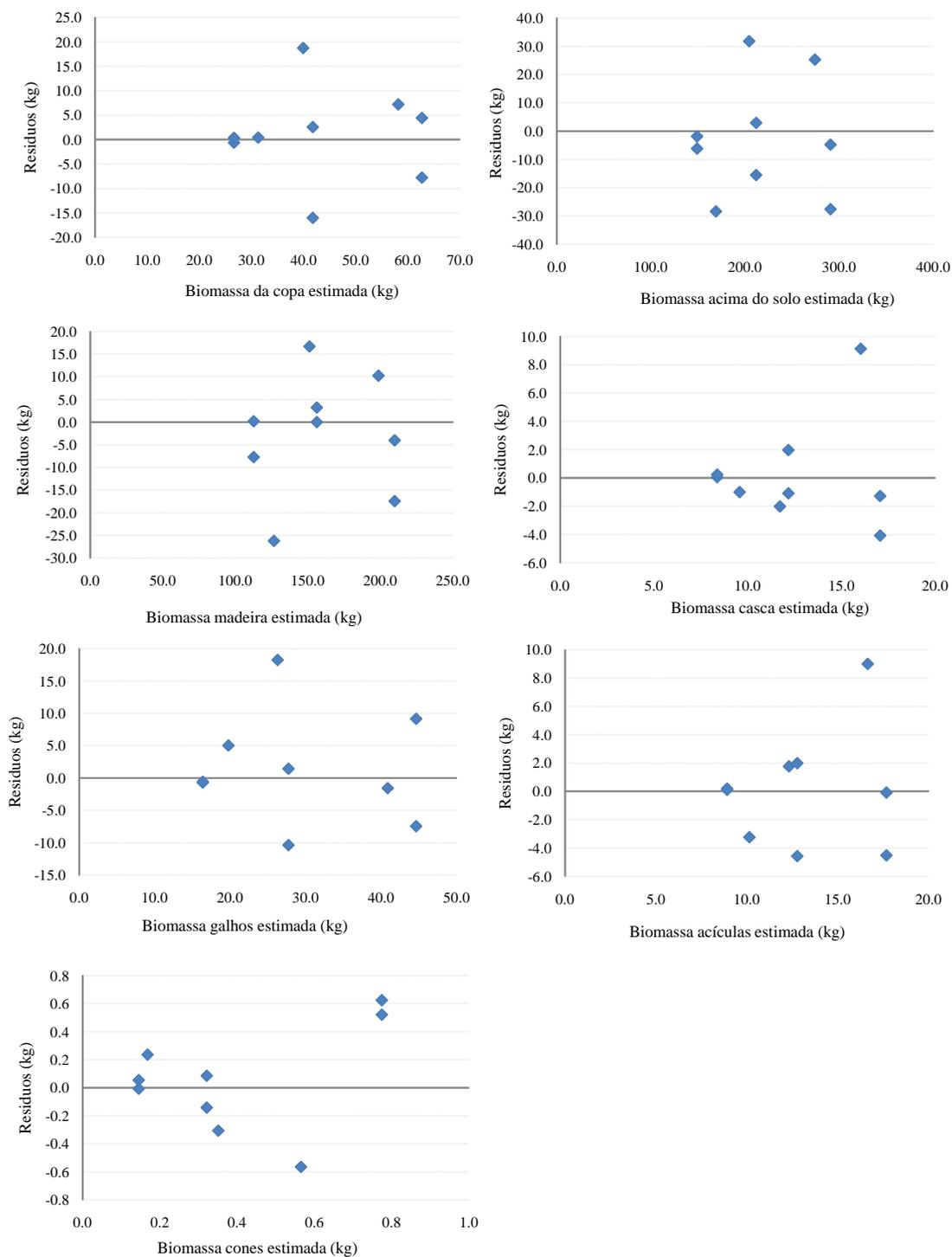
WILK, J. Local perceptions about forests and water in two tropical catchments. **GeoJournal**, Amsterdam, v. 50, p. 339-347, 2000.

WITSCHORECK, R. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS. 2008. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. **Technical Report 99/12**. Canberra: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1999. 35 p. Disponível em: <http://www.catchment.crc.org.au/pdfs/technical199912.pdf>. Acessado em: 21/05/2010.

APÊNDICES

Apêndice A - Resíduos versus biomassa estimada dos diferentes compartimentos de *Pinus taeda*.



Apêndice B – Análise da variância – Procedimento GLM (General Linear Model)

Transformação logarítmica dos dados= $\ln(x+1)$, onde x= concentração individual de cada elemento.

Variável Dependente: pH = $\ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	0.42219249	0.02483485	9.40	0.0001
Erro	62	0.16380626	0.00264204		
Total corrigido	79	0.58599875			

R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	pH média
0.72	2.71	0.05	5.70

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.07039616	0.00639965	2.42	0.0141
Fluxos	6	0.34562802	0.05760467	21.80	0.0001

Variável Dependente: Condutividade elétrica (CE)= $\ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	78.41435661	4.61260921	29.98	0.0001
Erro	62	9.53843839	0.15384578		
Total corrigido	79	87.95279500			

R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	CE média ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
0.89	9.93	0.39	86.92

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	4.55931298	0.41448300	2.69	0.0067
Fluxos	6	73.02225828	12.17037638	79.11	0.0001

Variável Dependente: $\text{NH}_4^+ = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	0.97372500	0.05727794	2.49	0.0044
Erro	66	1.51951667	0.02302298		
Total corrigido	83	2.49324167			

R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	N- NH_4^+ média (mg l^{-1} N)
0.39	74.32	0.15	0.247

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.63624167	0.05784015	2.51	0.0105
Fluxos	6	0.33748333	0.05624722	2.44	0.0341

Variável Dependente: $\text{NO}_3^- = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	106.3171893	6.2539523	56.20	0.0001
Erro	66	7.3447095	0.1112835		
Total corrigido	83	113.6618988			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	N- NO_3^- média (mg l ⁻¹ N)		
0.93	28.35	0.33	5.44		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	1.7880988	0.1625544	1.46	0.1679
Fluxos	6	104.5290905	17.4215151	156.55	0.0001

Variável Dependente: $\text{NO}_2^- = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	0.03489167	0.00205245	5.21	0.0001
Erro	66	0.02600714	0.00039405		
Total corrigido	83	0.06089881			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	N- NO_2^- média (mg l ⁻¹ N)		
0.57	66.43	0.020	0.0312		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.01598452	0.00145314	3.69	0.0004
Fluxos	6	0.01890714	0.00315119	8.00	0.0001

Variável Dependente: $\text{PO}_4^- = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	0.37642619	0.02214272	7.25	0.0001
Erro	66	0.20154048	0.00305364		
Total corrigido	83	0.57796667			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	P- PO_4^- média (mg l ⁻¹ P)		
0.65	41.97	0.055	0.146		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.21930952	0.01993723	6.53	0.0001
Fluxos	6	0.15711667	0.02618611	8.58	0.0001

Variável Dependente: $K^+ = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	32.26399524	1.89788207	33.07	0.0001
Erro	66	3.78726190	0.05738276		
Total corrigido	83	36.05125714			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	K^+ média (mg l ⁻¹)		
0.89	20.20	0.24	3.01		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	1.28317143	0.11665195	2.03	0.0387
Fluxos	6	30.98082381	5.16347063	89.98	0.0001

Variável Dependente: $Ca^{2+} = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	97.4864619	5.7344978	59.35	0.0001
Erro	66	6.3769619	0.0966206		
Total corrigido	83	103.8634238			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	Ca^{2+} média (mg l ⁻¹)		
0.94	17.72	0.31	9.339		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	4.16293810	0.37844892	3.92	0.0002
Fluxos	6	93.32352381	15.55392063	160.98	0.0001

Variável Dependente: $Mg^{2+} = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	42.25353333	2.48550196	63.41	00001
Erro	66	2.58689048	0.03919531		
Total corrigido	83	44.84042381			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	Mg^{2+} média (mg l ⁻¹)		
0.94	23.13	0.1980	2.109		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	1.09910952	0.09991905	2.55	0.0095
Fluxos	6	41.15442381	6.85907063	175.00	0.0001

Variável Dependente: $\text{SO}_4^{2-} = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	8.29514643	0.48794979	14.11	0.0001
Erro	66	2.28255238	0.03458413		
Total corrigido	83	10.57769881			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	SO_4^{2-} média (mg l ⁻¹)		
0.784	31.53	0.186	0.937		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.94935595	0.08630509	2.50	0.1325
Fluxos	6	7.34579048	1.22429841	35.40	0.0001

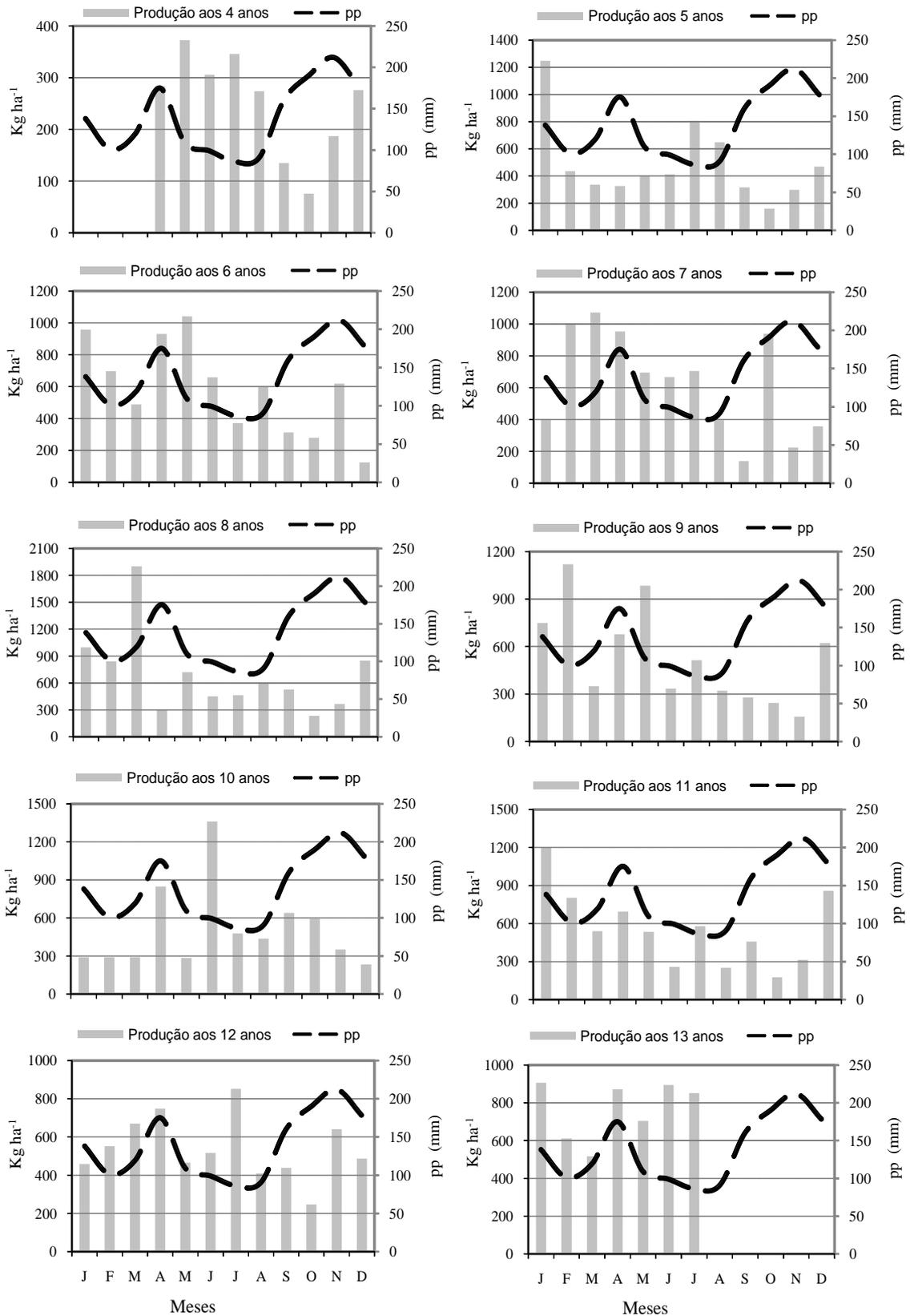
Variável Dependente: $\text{Cl}^- = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	11.65544286	0.68561429	12.33	0.0001
Erro	66	3.67037143	0.05561169		
Total corrigido	83	15.32581429			
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	Cl^- média (mg l ⁻¹)		
0.76	28.15	0.236	1.537		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	1.00972857	0.09179351	1.65	0.1051
Fluxos	6	10.64571429	1.77428571	31.90	0.0001

Variável Dependente: $\text{Na}^+ = \ln(x+1)$

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Modelo	17	4.00172500	0.23539559	7.51	00001
Erro	66	2.06877381	0.03134506		
Total corrigido	83				
R- Quadrado	C.V.	Raiz MSE	Na^+ média (mg l-1)		
0.659	47.86	0.177	0.509		
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F (Sob H0)	Pr > F
Repetição	11	0.71558452	0.06505314	2.08	0.0345
Fluxos	6	3.28614048	0.54769008	17.47	0.0001

Apêndice C – Sazonalidade da serapilheira produzida em diferentes idades, produção média e precipitação média mensal (pp) em um povoamento de *Pinus taeda*, Corrientes, Argentina.



Apêndice D – Distribuição mensal de nutrientes (macronutrientes em g kg^{-1} , e micronutrientes em mg kg^{-1}) na serapilheira produzida em um povoamento de *Pinus taeda*, Corrientes, Argentina.

