Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Hidráulica e Saneamento

Tiago Souza Mattos

**Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na
recarga de aquífero freático**

Versão Corrigida
São Carlos
2015

Tiago Souza Mattos

Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na recarga de aquífero freático

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Versão Corrigida
São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M425a Mattos, Tiago Souza
 Avaliação do impacto da substituição de pastagem
 por eucalipto na recarga de aquífero freático / Tiago
 Souza Mattos; orientador Edson Cezar Wendland. São
 Carlos, 2015.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2015.

 1. Recarga direta. 2. Sistema Aquífero Guarani. 3.
 Eucalipto. 4. Uso do solo. 5. WTF. 6. Equação de Darcy.
 I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **TIAGO SOUZA MATTOS**.

Título da dissertação: "Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na recarga de aquífero freático".

Data da defesa: 14/05/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Antonio Marozzi Righetto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Ricardo Cesar Aoki Hirata**
(Instituto de Geociências/IG-USP)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Ao meu pai Manoel da Conceição P. de Mattos (*in memoriam*),
que através do caráter e exemplo de vida, me ensinou o valor da
honestidade, perseverança e do trabalho na vida um homem.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado esperança, mesmo não merecendo.

Aos meus pais, Manoel e Edineide, sempre presentes em todos os momentos da minha vida. Se hoje cheguei onde estou é porque vocês sempre me incentivaram a lutar pelos meus sonhos, e me deram as condições para atingir os meus objetivos. Obrigado!

Ao meu orientador, professor Edson C. Wendland, por ter me aceitado como seu orientado, por ter confiado em mim, por ter me corrigido e elogiado quando eu necessitava. Se hoje eu me interesso por água subterrânea, é por causa da sua influência.

Ao meu irmão Neto, que trabalhou para que eu pudesse ter condições para estudar engenharia.

À minha Tia, Cirlene, que abriu a porta do seu lar e me recebeu de braços abertos em Salvador, quase me adotando como seu filho. Obrigado pelo incentivo Tia.

A todos os meus familiares, os quais sempre torceram por mim.

Ao meu caro amigo Caio Cezar Catiste Silva, por ter dividido apartamento comigo durante o tempo que permaneci em São Carlos. Foi muito boa a convivência. Você é um grande engenheiro. Desejo muita felicidade e sucesso para você.

Aos meus caros colegas do LHC: *Teacher* Murilo (Obrigado por ter dedicado parte do seu tempo para me transmitir um pouco do seu conhecimento. Aprendi muito com você.), Cabreira (Obrigado pelas aulas sobre evapotranspiração e pela boa convivência.), Davi (Infelizmente não foi possível aplicar o SPA no trabalho, mas no Latex deu tudo certo. Obrigado!), Antônio (Obrigado por ter me incentivado a vir para a EESC e por ter me dado moradia quando cheguei em São Carlos. Foi muito bom tê-lo conhecido.), a Ivan (Valeu pelos conselhos e pela aula de Latex.), Cristian (O minicurso de escrita e método científico foi muito proveitoso. Obrigado!), Paulo e Dulce (Foi muito bom tê-los conhecido. Obrigado pelo incentivo e conselhos.), A Jamil, Derly e Nathee (Obrigado pelos conselhos e por ter me ajudado a melhorar os meus relacionamentos com as pessoas que me cercam.)

Ao técnico Roberto Bérghamo por ter me acompanhado durante esses dois últimos anos no trabalho de campo na Bacia do Ribeirão da Onça.

A Sá, secretária da Pós-Graduação do Departamento de Hidráulica e Saneamento, por estar sempre disposta a tirar minhas dúvidas e me orientar no programa.

Aos funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

De tudo o que se tem ouvido, a suma é: Teme a Deus
e guarda os seus mandamentos; porque isto é
o dever de todo homem.

Bíblia Sagrada. Eclesiastes 12,13

RESUMO

MATTOS, Tiago Souza. *Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na recarga de aquífero freático*. 2015. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

As plantações florestais, historicamente, estão associada a intensos debates sobre o seu impacto na dinâmica da água do solo ou subterrânea. Nesse contexto, este trabalho buscou avaliar os possíveis impactos da mudança de cobertura do solo, de pastagem para eucalipto, sobre o aquífero freático em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. A área de pesquisa está localizada na bacia do Ribeirão da Onça, situada no município de Brotas, no centro-leste do Estado de São Paulo. Essa é monitorada desde 2004. Foram utilizados dois métodos para avaliar o impacto da mudança de uso do solo, o método iWTF e o método de Darcy. A partir desses métodos, estimou-se as taxas de recarga subterrânea, fluxo lateral, variação de armazenamento e percolação profunda. Além disso foram obtidas a variação do nível freático, espessura saturada e gradiente hidráulico horizontal para o aquífero na área de estudo. Durante os anos hidrológicos de 2005 a 2011, a recarga direta variou de 255 e 876 mm (iWTF), equivalente a 21% e 51% da precipitação anual correspondente. Após 2011, com a mudança de cobertura do solo de pastagem para eucalipto, não obstante os anos hidrológicos de 2012 e 2013 apresentarem precipitação próxima da média de longo período, a recarga direta foi estimada em cerca de 210 mm (2012) e 147 mm (2013), equivalentes a 13% e 10% da precipitação anual. A diminuição na recarga direta levou à redução da espessura saturada, variação do nível freático, gradiente hidráulico horizontal, fluxo lateral e armazenamento anual. Além disso, pode-se perceber que a plantação florestal está exercendo influência sobre a área de pastagem adjacente à plantação. Tem-se observado essa influência através da existência de fluxo transversal em direção à plantação florestal, o qual tem elevado o armazenamento no período de estiagem. Os resultados indicam que a plantação de eucalipto afetou significativamente o comportamento sazonal e anual do balanço hídrico na área de estudo.

Palavras-chave: recarga subterrânea. usos do solo. Lei de Darcy. WTF.

ABSTRACT

MATTOS, Tiago Souza. *Impact evaluation of pasture replacement by eucalyptus in groundwater aquifer recharge*. 2015. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Historically forest plantations are associated with intense debate about its impact on soil water dynamics or groundwater. Thus, the objective of this study was to evaluate the potential impacts of land cover change of pasture to eucalyptus on the groundwater in an outcrop zone of the Guarani Aquifer System. The study area is located in the Ribeirão da Onça watershed, located in the municipality of Brotas, in the center-east of the state of São Paulo. To assess the impact of land cover change, I used two methods: i. iWTF and ii. Darcy. From these methods, we estimated groundwater recharge rates, lateral flow, water storage variation and deep percolation. Furthermore, I obtained the water table variation, saturated thickness and horizontal hydraulic gradient into the aquifer in the study area. During the hydrological years 2005-2011, the direct recharge through the results of iWTF method varied between 256 and 876 mm, equivalent to 21% and 51% of the corresponding annual precipitation. After 2011, with the land cover change of pasture to eucalyptus, the direct recharge was computed at about 210 mm (2012) and 147 mm (2013), equivalent to 13% and 10% of the annual precipitation. I did not find significant difference in the annual precipitation in these years compared to the historical mean. Therefore, my findings have shown that the decrease of direct recharge are associated to the land cover change of pasture to eucalypts. The decrease in direct recharge leads to the reduction of saturated thickness, the water level variation, horizontal hydraulic gradient, lateral flow and annual storage. Moreover, it can be seen that the forest plantation has influenced the pasture area, adjacent to the plantation. It has been observed that influence through the existence of cross flow toward the forest plantation, which has high storage, especially in the dry season. The results indicate that the eucalyptus plantation significantly affected the seasonal and annual behavior of the water balance in the study area.

Keywords: groundwater recharge. land use. Darcy's Law. WTF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura	1 - Conservação da massa em um aquífero freático.	34
Figura	2 - Extensão do SAG na América do Sul.	36
Figura	3 - Áreas de Afloramento e confinamento do SAG.	37
Figura	4 - Mecanismos de recarga direta e indireta.	39
Figura	5 - Modelo conceitual do processo de recarga.	40
Figura	6 - Balanço hídrico em uma coluna de solo.	45
Figura	7 - Corte de uma bacia hidrográfica com as componentes do balanço hídrico. .	46
Figura	8 - Hidrógrafa de um poço de monitoramento.	48
Figura	9 - Aquífero freático, entre dois longos rios paralelos, em condição não perma- nente.	49
Figura	10 - Visão geral dos métodos usados para determinar a condutividade hidráulica.	51
Figura	11 - Slug Test e Bail Test.	52
Figura	12 - Esquema de aparelho para determinação do rendimento específico em la- boratório.	56
Figura	13 - Localização da área de estudo - Bacia do Ribeirão da Onça.	59
Figura	14 - Altimetria da Bacia do Ribeirão da Onça.	60
Figura	15 - Mapa geológico na região da bacia do Ribeirão da Onça.	61
Figura	16 - Mapa pedológico na região da bacia do Ribeirão da Onça.	62
Figura	17 - Mapa de uso do solo na Bacia do Ribeirão da Onça para 2014	63
Figura	18 - Tipos de Uso do Solo na BRO.	64
Figura	19 - Localização das áreas de estudo na Bacia do Ribeirão da Onça.	65
Figura	20 - Folhas, tronco e semente do Urograndis.	66
Figura	21 - Localização dos poços de monitoramento.	68
Figura	22 - Pontos de coleta de amostras indeformadas de solo na BROA.	71
Figura	23 - Esquema de representação dos poços de observação na BRO.	73
Figura	24 - Balanço hídrico em poço.	74
Figura	25 - Balanço hídrico entre poços.	75
Figura	26 - Correlação entre a precipitação mensal de 2013 e 2014 das estações Monte Alegre, Sta Maria da Fábrica em relação ao CRHEA.	80
Figura	27 - Correlação entre a precipitação mensal de 1983 a 1996 das estações Ribeir- rão do Feijão, Usina do Lobo e Faz. Campo Alegre em relação ao CRHEA.	80
Figura	28 - Variação mensal do nível d'água para os poços 16 e 05, como diferença da média histórica.	82
Figura	29 - Variação mensal e anual média do nível d'água para os poços 19, 18, 17 e 16 (<i>site 1</i>), como diferença da média histórica.	83
Figura	30 - Espessura saturada nos poços de monitoramento da fazenda Monte Alegre.	84

Figura 31 - Gradiente hidráulico horizontal entre os poços de monitoramento.	85
Figura 32 - Recarga direta anual estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.	87
Figura 33 - Recarga direta anual acumulada estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.	87
Figura 34 - Recarga direta mensal estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.	88
Figura 35 - Variação de armazenamento anual estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	89
Figura 36 - Variação de armazenamento anual acumulado estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	90
Figura 37 - Variação de armazenamento mensal médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	90
Figura 38 - Fluxo lateral diário estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	91
Figura 39 - Fluxo lateral anual médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	91
Figura 40 - Fluxo lateral anual acumulado estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.	92
Figura 41 - Fluxo lateral mensal médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	93
Figura 42 - Recarga profunda anual estimada pelo método iWTF.	93
Figura 43 - Recarga profunda mensal estimada pelo método iWTF.	94
Figura 44 - Fluxo lateral diário médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.	96
Figura 45 - Correlação entre a recarga anual e mensal obtidas para o método iWTF e Darcy.	97
Figura 46 - Correlação da recarga anual do método iWTF e Darcy com os obtidos pelo WTF.	97
Figura 47 - Nível de água dos poços 25 e 19 para o período 2012 a 2014.	100
Figura 48 - Fluxo transversal da área de pastagem para a área de eucalipto na fazenda Monte Alegre.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela	1 - Características hidráulicas do SAG no Estado de São Paulo.	39
Tabela	2 - Técnicas para estimar recarga em regiões com clima árido, semiárido e úmido.	43
Tabela	3 - Caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão da Onça.	61
Tabela	4 - Textura do solo no perfil de 1,0 m de profundidade.	65
Tabela	5 - Diferença entre os métodos usados para a estimativa da recarga subterrânea.	68
Tabela	6 - Características dos poços de monitoramento.	69
Tabela	7 - Valores de S_y para diferentes pontos de coleta.	70
Tabela	8 - Dados utilizados na aplicação do iWTF.	74
Tabela	9 - Escala de classificação para o SPI.	76
Tabela	10 - Precipitação mensal e anual para os anos hidrológicos de 2005 a 2014.	79
Tabela	11 - Coeficiente de variação e Precipitação anual para os anos hidrológicos de 1983 a 1996.	81
Tabela	12 - Condutividade hidráulica saturada estimada para diferentes profundidades.	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAG	Sistema Aquífero Guarani
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de florestas Plantadas
AC	Aquífero Confinado
AL	Aquífero Livre
IAF	Índice de Área Foliar
BRO	Bacia do Ribeirão da Onça
PFN	Plano de Fluxo Nulo
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i>
iWTF	<i>Improved Water Table Fluctuation</i>
CDG	Curva de Distribuição Granulométrica
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PCA	Pontos de Coleta de Amostras
ANA	Agência Nacional das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Permeabilidade
K	Condutividade Hidráulica
T	Transmissividade
ϕ	Carga Hidráulica
p	Pressão
ρ	Massa Específica
μ	Viscosidade Dinâmica
g	Gravidade
n	Porosidade
q	Descarga Específica
ad	Adimensional
S	Coefficiente de Armazenamento
Sr	Retenção Específica
Sy	Rendimento Específico
Ss	Armazenamento Específico
α	Compressibilidade do Meio Poroso
β	Compressibilidade do fluido
θ	Conteúdo de Umidade do Meio Poroso
e	Índice de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	Geral	23
2.2	Específicos	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Hidrologia Florestal	25
3.1.1	Hidrologia de plantações	25
3.1.2	Fisiologia das árvores	29
3.1.3	Manejo das plantações florestais	30
3.2	Hidráulica de Água Subterrânea	30
3.2.1	Conceitos preliminares	30
3.2.2	Propriedades da água e do meio poroso	31
3.2.3	Escoamento subterrâneo	33
3.3	Sistema Aquífero Guarani	36
3.3.1	Características hidrogeológicas	38
3.4	Recarga Subterrânea	39
3.4.1	Terminologia	39
3.4.2	Modelo Conceitual do Processo de Recarga	40
3.4.3	Fatores que influenciam a recarga subterrânea	41
3.4.4	Desafios na estimativa da recarga	42
3.4.5	Métodos de estimativa de recarga	43
3.4.5.1	Balanço hídrico	44
3.4.5.2	Método de Darcy	46
3.4.5.3	Método da variação da superfície livre	47
3.4.5.4	iWTF	48
3.4.6	Métodos para determinação da K	50
3.4.7	Métodos para determinação de Sy	56
4	ÁREA DE ESTUDO	59
4.1	Bacia do Ribeirão da Onça	59
4.1.1	Localização e Clima	59
4.1.2	Caracterização física	60
4.1.3	Geologia e Pedologia	61
4.1.4	Uso e Ocupação do solo	63
4.2	Descrição dos Sites	65
5	MATERIAIS E MÉTODOS	67
5.1	Seleção dos métodos	67

5.2	Coleta de dados	68
5.2.1	Monitoramento do nível freático	68
5.2.2	Monitoramento da precipitação	69
5.3	Estimativa do Rendimento específico	70
5.4	Estimativa da condutividade hidráulica	71
5.5	Aplicação dos métodos	72
5.5.1	Variação dos níveis	72
5.5.2	Aplicação do iWTF	73
5.5.3	Aplicação do método de Darcy	75
5.6	Índice Meteorológico de Seca	76
5.7	Análise estatística	77
6	RESULTADOS	79
6.1	Variabilidade da Precipitação	79
6.2	Variação dos níveis	81
6.3	Espessura saturada e Gradiente hidráulico	84
6.4	Condutividade hidráulica	85
6.5	Recarga direta	86
6.6	Variação de armazenamento	88
6.7	Fluxo lateral	90
6.8	Recarga profunda	93
7	DISCUSSÃO	95
7.1	Comparação entre os métodos	95
7.2	Análise dos resultados	98
8	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A – Análise estatística	112
	APÊNDICE B – Precipitação mensal	119
	APÊNDICE C – Variação dos níveis	123
	APÊNDICE D – Espessura saturada e Gradiente hidráulico médio mensal	125
	APÊNDICE E – Variação de armazenamento, Fluxo lateral, Percolação profunda e Recarga direta.	128
	APÊNDICE F – Levantamento topográfico.	135
	APÊNDICE G – Índice Meteorológico de Seca.	136
	ANEXO A – Curvas de Distribuição Granulométrica	137

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos mais importantes aquíferos transfronteiriços do mundo e que se estende pela Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, ocupando uma área de aproximadamente 1,2 milhões de km². Devido a sua importância econômica e social para os quatro países, faz-se necessário o uso adequado deste recurso.

Um passo importante em direção a esse objetivo é o desenvolvimento dos estudos hidrogeológicos focados na avaliação dos impactos da mudança de uso e ocupação do solo sobre as taxas de recarga subterrânea. Isto é particularmente relevante nas áreas dos trópicos utilizadas para plantações florestais, visto que tem-se testemunhado um elevado crescimento dessas desde meados do século XX (ONYEKWELU; STIMM; EVANS, 2011).

As plantações florestais tropicais cobriam, em 1965, uma área de 6,7 milhões de hectares (ha), passando em 1980 para cerca de 21 milhões ha. Em 1990 esse valor passou para aproximadamente 62 milhões ha, chegando quase a duplicar no ano 2005, atingindo o valor de 109 milhões ha. Na América do Sul, Brasil, Argentina e Chile são os líderes em áreas utilizadas para plantações florestais (ONYEKWELU; STIMM; EVANS, 2011). Mais de 100 espécies de árvores são usadas em estabelecimentos de plantações, embora, apenas três gêneros (Acácia, Pinus e Eucalyptus) representam mais de 50% de todas as plantações florestais tropicais (FAO, 2003).

Várias espécies de eucaliptos e de pinus encontraram condições de crescimento bastante favoráveis no Brasil, e a cultura destas espécies cresceram rapidamente no país. Atualmente, o Brasil possui cerca de 6,7 milhões ha de florestas plantadas, principalmente com espécies do gênero Eucalyptus e Pinus, que representam cerca de 0,8% do território nacional (ABRAF, 2013). Os Estados de Minas Gerais (22,3%), São Paulo (17,8%), Paraná (12,3%), Bahia (9,3%), Santa Catarina (9,7%), Mato Grosso do Sul (9,0%) e Rio Grande do Sul (6,7%) destacam-se no cenário nacional como detentores de 87,1% da área total de plantios florestais (ABRAF, 2013).

Existe uma opinião popular generalizada de que as espécies de eucalipto, além de outros efeitos, são responsáveis por um alto consumo de água, e que o reflorestamento com esta espécie poderia, portanto, ser prejudicial aos recursos hídricos. Estas especulações são correntes não apenas no Brasil, mas também em outros países (LIMA, 1993).

No meio acadêmico existe divergência sobre a relação entre eucalipto e consumo de água. Há aqueles que defendem que se grandes áreas forem utilizadas para o plantio de espécies de rápido crescimento, como as espécies de *Eucalyptus grandis*, poderá levar à redução da produção de água e diminuição do nível freático na bacia hidrográfica (ANON, 1992), ou ainda afirmam que, em termos absolutos, os eucaliptos usam mais água que outras espécies (BOUVET, 1999). Outros defendem que o eucalipto se comporta de forma semelhante a outras espécies florestais no que diz respeito à dinâmica da água do solo ou subterrânea (LIMA et al., 1990), e ainda que, considerando o ciclo de crescimento, o uso de água pela plantação de

eucalipto pode ser inferior ao da floresta nativa, principalmente no início do ciclo ([ALMEIDA; SOARES, 2003](#)).

Apesar de muitos estudos terem sido realizados, pode-se observar que o assunto em questão não foi esgotado devido à sua complexidade. De acordo com [Lima \(1993\)](#) há ainda aspectos fundamentais que merecem alguma experimentação. Um deles é o efeito das plantações de eucalipto sobre a dinâmica da água subterrânea.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Quantificar experimentalmente o impacto da mudança de cobertura do solo de pastagem para eucalipto (*E. grandis* x *E. urophylla*), sobre as taxas de recarga subterrânea em aquífero freático.

2.2 Específicos

- Comparar em uma mesma área os níveis de água em poços, quando a área era ocupada com pastagem, e depois com plantação de eucalipto;
- Analisar a variação dos níveis de água em áreas com eucalipto e pasto, para o mesmo período e condições climáticas;
- Estimar as taxas anuais de variação de armazenamento, fluxo lateral, recarga profunda e recarga direta na área de estudo;
- Comparar as estimativas das taxas anuais de variação de armazenamento, fluxo lateral, recarga profunda e recarga direta, quando a área em estudo estava ocupada com pastagem, e depois com plantação de eucalipto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrologia Florestal

3.1.1 Hidrologia de plantações

Grande número de estudos realizados no Brasil e em outras partes do mundo tem quantificado e comparado o uso da água para diferentes tipos de vegetação, possibilitando a inferência sobre os possíveis impactos da mudança de cultura sobre os recursos hídricos. Isso tem sido realizado, por exemplo, estimando a transpiração através da equação de Penman-Monteith (ALMEIDA et al., 2007; DYE, 1987), quantificando as componentes do balanço hídrico e obtendo a evapotranspiração como residual (LIMA et al., 1990; SALEMI et al., 2013), mensurando a transpiração (*sap flux*) ou os fluxos turbulentos de vapor de água através da correlação de turbilhões (*eddy covariance*) (CABRAL et al., 2010; HUBBARD et al., 2010; WILSON et al., 2001), avaliando o comportamento do *runoff* de bacias pareadas (FARLEY; JOBBAGY; JACKSON, 2005) e através da análise dos dados do deflúvio de múltiplas bacias (SCOTT; LESCH, 1997).

Desenvolvimento da hidrologia florestal

Um dos primeiros estudos a observar o chamado ‘efeito das plantações’, descrito por Rosoman (1994), sobre os recursos hídricos, analisou a substituição de floresta nativa por plantação de pinus, tendo concluído que o deflúvio foi menor para a plantação, devido a maior evapotranspiração, durante todos os meses do ano (SWANK; DOUGLASS, 1974). Estudos posteriores dedicaram-se a avaliar o impacto das plantações através do balanço hídrico ao longo de vários anos (TIWARI; MATHUR, 1983).

Em revisão sobre o uso da água de eucaliptos no sul da Índia, Calder (1986) concluiu que as taxas de transpiração da *Eucalyptus sp.* são, provavelmente, similares a de outras espécies de árvores, exceto em situações onde a espécie de eucalipto em questão está crescendo em área onde a demanda atmosférica é elevada e a água no solo está facilmente disponível. Dye (1987), utilizando a equação de Penman-Monteith para estimar a transpiração diária de *Eucalyptus grandis*, quantificou uma transpiração diária média de 4,7 mm em área experimental localizada na África do Sul. Foi realizada, também, análise de sensibilidade, a qual indicou que a condutância estomatal e o déficit de pressão de vapor são os principais fatores que regulam a perda de água pela copa do eucalipto. McJannet, Vertessy e Clifton (2000), na Austrália, compararam medições de evapotranspiração em plantações florestais e pastagens. Na primavera, a evapotranspiração da pastagem foi 65% da observada na plantação; no verão, a evapotranspiração da pastagem foi somente 35% dessa, o que demonstra que quando se avalia a evapotrans-

piração entre ecossistemas distintos, os resultados variam em função das condições ambientais (CALDATO; SCHUMACHER, 2013).

A variação no deflúvio em decorrência do florestamento, em área de pastagem, com *Eucalyptus grandis* e *Pinus patula*, foi avaliada por Scott e Lesch (1997) utilizando bacias pareadas. Os autores observaram que o florestamento com eucalipto e pinus não apenas levou a redução significativa ($P < 0.05$) do deflúvio, como também causou o completo cessar do fluxo no nono e décimo segundo ano, após o plantio, respectivamente.

Duas revisões chave sobre o efeito hidrológico do florestamento concluíram que o florestamento leva a redução do deflúvio, enquanto o desflorestamento aumenta, embora os efeitos variam consideravelmente e não são sempre previsíveis (BOSCH; HEWLETT, 1982; BROWN et al., 2005). Além disso, Bosch e Hewlett (1982) após revisão de 94 experimentos, concluíram, de modo geral, que:

- coníferas e eucalipto causam variação no deflúvio de aproximadamente 40 mm para cerca de 10% de mudança na cobertura florestal¹;
- arbustos e pastagem estão associados com uma variação no deflúvio de aproximadamente 10 mm para 10% de mudança na cobertura;
- redução na cobertura florestal de menos de 20%, aparentemente, não podem ser detectados pela medida do deflúvio (método hidrométrico).

É importante ter em vista que a escala da bacia é fundamental na determinação dos efeitos hidrológicos da plantação, enquanto fatores podem dificultar a detecção das mudanças no deflúvio de grandes bacias (BROWN et al., 2007). Stednick (1996) revisou os resultados de estudos realizados nos Estados Unidos e procurou somente mudanças na produção anual de água como resultado da colheita de plantações florestais. O foco estava sobre o efeito da percentagem de área tratada com o intuito de detectar mudanças no deflúvio. As bacias hidrográficas em estudo foram discriminadas em função dos seus regimes de temperatura e precipitação, sendo concluído que:

- em geral, mudanças no deflúvio anual em decorrência da redução da cobertura florestal de menos do que 20%, possivelmente, não será detectada por medidas realizadas através de métodos hidrométricos; e
- os dados sugerem que essa percentagem (20%) varia, dependendo da temperatura e precipitação da área. Por exemplo, um aumento mensurável no deflúvio é observado para tratamentos de 15% da área da bacia em *Rocky Mountains* comparado com cerca de 50% da área em *Central Plains*, embora a resposta dos sistemas sejam variáveis.

¹ A percentagem refere-se ao aumento ou diminuição da área tratada.

Farley, Jobbagy e Jackson (2005) analisaram dados de 26 bacias (504 observações anuais) para avaliar os efeitos do estabelecimento de plantações florestais, em áreas outrora coberta por pastagem. Foi encontrado que áreas florestadas com eucaliptos apresentaram redução no *runoff*² anual em até 75%, comparado com 40% de decréscimo médio para as áreas florestadas com pinus. A redução absoluta no *runoff* anual foi maior em locais mais úmidos, mas proporcionalmente foram significativamente maiores em sites com clima mais seco. Segundo os autores, os resultados sugerem que em regiões onde o *runoff* natural é menor do que 10% da precipitação anual média, o florestamento deve resultar em completa perda do *runoff*; onde o *runoff* natural é 30% da precipitação, poderá ser reduzido à metade ou mais. Existe possibilidade de que o florestamento intensifique estiagens em muitos locais (FARLEY; JOBBAGY; JACKSON, 2005). É importante salientar que a mudança do tipo de vegetação não afetará somente o fluxo anual médio mas também a variabilidade anual do fluxo. Peel et al. (2001) notou que diferenças na variabilidade anual do *runoff* foram devidas a dois fatores, a variabilidade anual da precipitação e a distribuição da vegetação.

Através da análise de 504 microbacias em diversas partes do mundo, Jackson et al. (2005) relatam que em 52% dos casos, as plantações diminuíram o fluxo, em média, cerca de 227 mm por ano, globalmente, e 13% dos cursos de água secaram completamente por pelo menos um ano. Como resultado da análise de dados de cerca de 250 bacias experimentais em todo o mundo, Zhang, Dawes e Walker (2001), desenvolveram um modelo matemático simples relacionando a evapotranspiração na escala de bacia com a precipitação anual. As então chamadas ‘Zhang curves’ predizem que o maior acesso à água por parte da plantação florestal, incorre em maior consumo de água e produção de madeira. O modelo também indica que florestamento em áreas de pastagem aumentam o consumo de água, mas a diferença no consumo entre a floresta e a pastagem é somente evidente quando a precipitação excede cerca de 750 mm.

Após apresentar a perspectiva histórica da controvérsia relacionada com o impacto hidrológico das florestas, Andreassian (2004) concluiu, entre outros, que o efeito desse sobre o fluxo mínimo parece bem estabelecido: reflorestamento diminui e o desflorestamento aumenta o fluxo mínimo dos rios, ou seja, os períodos de fluxo em geral são encurtados pelo reflorestamento, o qual pode causar o completo cessar do fluxo no rio. Contudo, note que o impacto do reflorestamento pode mudar ao longo do tempo.

Em estudo sobre os efeitos hidrológicos em duas bacias adjacentes, uma coberta por pastagem e a outra com *E. globulus*, Adelana et al. (2015) observaram que o deflúvio na bacia florestada foi menor do que na bacia coberta por pastagem. Os autores também observaram que a evapotranspiração na bacia florestada resultou em significativa queda do nível freático, resultando em menor fluxo de base.

² Os autores utilizam o termo *runoff* para se referir ao deflúvio anual das bacias hidrográficas.

É interessante observar que, embora exista grande preocupação quanto ao uso da água por plantações florestais, existem situações onde o elevado consumo de água por essas é desejável. Como exemplo, pode-se citar os problemas de salinização dos recursos hídricos superficiais, em determinadas regiões da Austrália, devido ao estabelecimento da agricultura em áreas outrora cobertas por florestas. Assim, diferentes estratégias de reflorestamento têm sido empreendidas de modo a reverter esse processo (BELL et al., 1990). Crosbie et al. (2007), avaliando o efeito do reflorestamento de áreas de pastagem nos recursos hídricos de modo a diminuir a salinização, verificaram que cinco anos após a mudança de uso do solo, os níveis da água subterrânea caíram significativamente devido à redução drástica da recarga, o *runoff* também foi reduzido e a relação entrada-saída da quantidade de sal da bacia hidrográfica caiu pela metade.

Estudos realizados no Brasil

Os primeiros estudos realizados no Brasil concentraram-se em mensurar a transpiração dos eucaliptos, sendo que os resultados indicaram que a taxa é similar à de outras espécies florestais, decrescendo substancialmente durante os períodos de estiagem (VILLAÇA; FERRI, 1954). Estudos posteriores avaliaram o consumo de água por transpiração, através de balanço hídrico, de *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea* e Cerrado, tendo os autores encontrado valores médios de evapotranspiração de 921,8 mm (82% da precipitação), 716,6 mm (64%) e 576,7 (51%), respectivamente (LIMA et al., 1990). Os resultados mostraram que a média anual de extração de água do solo por transpiração na plantação de eucaliptos foi cerca de 215 mm maior que a do Cerrado, sendo também maior que a da plantação de pinus. Vital, Lima e Camargo (1999) estudando o efeito de uma plantação de *Eucalyptus saligna*, estabelecida em área de pastagem, sobre o deflúvio da microbacia experimental, verificaram que ao longo de 7 anos de crescimento da plantação, o deflúvio anual diminuiu gradativamente, tendo apresentado aumento (115 mm) somente a partir do primeiro ano após o corte raso dos eucaliptos.

Em pesquisa realizada comparando *Eucalyptus grandis* com Mata Atlântica, Almeida e Soares (2003) verificaram, entre outros, que o eucalipto apresenta um bom controle estomático, principalmente em períodos de estiagem. Os autores observaram que nos anos em que a precipitação anual é próxima da média histórica, a razão entre evapotranspiração (ET) e a precipitação anual (P) é aproximadamente unitária, o que significa que a ET entre as florestas, em anos com boa disponibilidade hídrica, são muito semelhantes. Já em períodos de estiagem, os autores observaram que a relação ET/P era superior a 1,0 para ambos os ecossistemas, mas com a Mata Atlântica apresentando valores superiores ao da plantação de eucalipto, e portanto maior uso de água por parte daquela.

Almeida et al. (2007), trabalhando com clones de eucaliptos híbridos (*Eucalyptus grandis* x *urophyla*), ao longo de toda a rotação da plantação (7 anos), estimaram uma evapotranspiração anual média de 1092 mm, correspondendo a 95% da precipitação anual média do período. Esses valores são muito próximos dos obtidos, de 2006 a 2008, por Cabral et al. (2010), através

da correlação de turbilhões, para o *Eucalyptus grandis* x *urophyla*. Os autores mensuraram para a soma da transpiração com a interceptação o valor de 82% (1124 mm) e 96% (1235 mm) da precipitação anual (P) para o primeiro e segundo ano, respectivamente.

Resumindo, a maioria dos estudos concluem que:

- Quando se compara espécies florestais, não existe grandes diferenças quanto ao uso da água (LIMA, 1993; LIMA et al., 1990);
- Florestas usam mais água, produzem menos *runoff*, recarga subterrânea e deflúvio do que vegetações com sistema radicular raso, como pastagem (CROSBIE et al., 2007; FARLEY; JOBBAGY; JACKSON, 2005);
- O impacto das florestas sobre os recursos hídricos varia ao longo do tempo, apresentando menor uso da água no período de estiagem (ANDREASSIAN, 2004; ALMEIDA; SOARES, 2003; BROWN et al., 2005).

Algumas das observações acima estão sujeitas a variações. Aspectos importantes que podem causar diferenças no uso da água para plantações, com condições semelhantes de clima e terreno, são discutidos abaixo.

3.1.2 Fisiologia das árvores

Existe um relacionamento positivo muito forte entre área foliar, crescimento e transpiração (HUBBARD et al., 2010). Almeida et al. (2007), notaram que a eficiência do uso da água pela plantação de eucaliptos e o incremento do crescimento foram positivamente relacionados pelo índice de área foliar (IAF) e pela disponibilidade de precipitação. Diferenças ao longo do tempo na transpiração média entre as espécies, podem surgir de diferenças na alocação de biomassa, distribuição das raízes e controle estomatal (VAN DIJK; KEENAN, 2007). Almeida et al. (2007) verificaram que o uso da água pelos eucaliptos ocorreu entre 0,60 e 1,00 m de profundidade, sugerindo que os maiores consumos ocorreram onde havia maior concentração de raízes finas.

Muitas espécies de plantações florestais têm sido selecionadas em função da relação entre o rápido crescimento e o incremento anual de madeira relativo aos primeiros anos da plantação florestal (VAN DIJK; KEENAN, 2007). Estudos têm observado que o IAF e o uso da água, no início da rotação, cresce rapidamente e, então, gradualmente diminui com os anos (ALMEIDA et al., 2007).

Diferenças fisiológicas na estrutura da copa das árvores podem ter influência sobre a interceptação da precipitação e por consequência sobre as outras componentes do balanço hídrico

(SALEMI et al., 2013). Perdas por interceptação com eucalipto na Austrália, Índia e Israel variaram entre 10 e 34% da precipitação anual (CALDER, 1986; WHITEHEAD; BEADLE, 2004). No Brasil, a perda média por interceptação para *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade foi estimada em 11% da precipitação anual (SOARES; ALMEIDA, 2001).

3.1.3 Manejo das plantações florestais

Além das características fisiológicas, o uso da água pode ser influenciado pelo próprio manejo da plantação florestal. A localização, o desenho espacial das árvores plantadas e a aplicação de desbastes e podas (que diminuem a área foliar) são opções de manejo que influenciam no uso da água (CALDATO; SCHUMACHER, 2013). Estabelecer as plantações longe de cursos de água e linhas de drenagem já é uma prática comum em muitos países (embora por outras razões) e pode reduzir o impacto das árvores nos recursos hídricos (VAN DIJK; KEENAN, 2007). Em estudo realizado na região tropical úmida da Índia, o uso da água por *E. tereticornis* foi comparado em sítios com densidades distintas (1800 e 1090 árvores.ha⁻¹), sendo observado que o uso da água foi menor para a plantação com menor densidade (KALLARACKAL; SOMEN, 1997).

As operações florestais podem envolver o uso de maquinário pesado e práticas não adequadas na preparação, plantio, desbaste e colheita no site, os quais podem danificar o solo, aumentando o escoamento superficial, diminuindo a infiltração, resultando em menor fluxo de base no período de estiagem (BRUIJNZEEL, 2004).

3.2 Hidráulica de Água Subterrânea

3.2.1 Conceitos preliminares

Aquíferos

Aquífero é uma formação geológica, ou um grupo de formações, o qual (i) contem água e (ii) pode transmitir quantidade significativa de água sob um gradiente hidráulico. Em contraste, um aquitarde é um estrato que pode transmitir água, mas a uma taxa muito menor se comparado a um aquífero. É frequentemente referido como uma formação semipermeável. Já um aquicludo é uma formação que pode conter água (algumas vezes em quantidade apreciável), mas exclui o fluxo através do estrato (BEAR, 2012).

Aquíferos podem ser confinados (AC) ou não confinados, também chamados livres (AL). Um aquífero confinado é aquele que está delimitado no topo por uma camada impermeável ou pouco permeável (aquitardes), apresentando normalmente pressão maior que a pressão atmos-

férica. Aquíferos livres, em contrapartida, têm o nível freático como fronteira superior, e sobre esse incide a pressão atmosférica (DEMING, 2002).

Isotropia e homogeneidade

Para os propósitos deste trabalho, a homogeneidade e isotropia do meio poroso refere-se à propriedade permeabilidade (k). De modo geral, esse termo pode ser aplicado a outras propriedades.

O meio poroso é dito homogêneo se a permeabilidade é a mesma em todos os pontos. Caso contrário, é dito ser heterogêneo. Se a permeabilidade em um ponto considerado é independente da direção, o meio é considerado isotrópico neste ponto. O mais comum, entretanto, é que o meio em estudo tenha suas propriedades dependentes da direção, sendo chamado anisotrópico. Essas considerações podem ser aplicadas também para a condutividade hidráulica (K) e a transmissividade (T).

Carga hidráulica

Sendo um fluido, a água desloca-se da maior para a menor condição de energia. No meio poroso, o deslocamento da água dar-se em função da diferença de carga hidráulica. A carga hidráulica (ϕ) em um ponto do aquífero é expresso como a soma da carga de pressão ($p/\rho g$) e da carga de posição (z).

$$\phi = \frac{p}{\rho g} + z \quad (1)$$

Na Equação 1, z é a distância de um ponto b em relação ao plano de referência (normalmente o nível médio do mar), p é a pressão hidrostática no ponto e ρg é o peso específico da água, onde ρ é a massa específica da água e g a aceleração da gravidade.

3.2.2 Propriedades da água e do meio poroso

Armazenamento e Rendimento específico

O armazenamento específico é um parâmetro físico que descreve a habilidade do meio poroso de armazenar e liberar fluidos, assumindo que a compressão da matriz sólida seja negligenciável. Assim, o volume normalizado de fluido ($\Delta V_w/V_T$) que é liberado do meio poroso em resposta a mudança na carga hidráulica (ϕ), isto é, a medida da habilidade do aquífero em

liberar (ou absorver) água subterrânea, é (DEMING, 2002):

$$\frac{\Delta V_w}{V_T} \cdot \frac{1}{-\Delta\phi} = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (2)$$

O lado direito da equação 2, a qual inclui a massa específica do fluido (ρ), aceleração da gravidade (g), porosidade (n), compressibilidades do meio poroso (α) e do fluido (β), define a quantidade conhecida como armazenamento específico (S_s) [L^{-1}]:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (3)$$

Para o aquífero não confinado, o coeficiente de armazenamento (S) [ad], sem analisar a relação interna da compressibilidade do fluido e da matriz sólida, pode ser definido como o volume liberado (ou absorvido) (ΔV_w) por unidade de área horizontal (A) do aquífero e por unidade de declínio (ou elevação) do nível d'água ($\Delta\phi$) (BEAR, 2012):

$$S = \Delta V_w / (A \cdot \Delta\phi) \quad (4)$$

No aquífero livre, a água é drenada do espaço volumétrico dos poros entre dois níveis (cotas) da superfície freática. O armazenamento no aquífero freático é, portanto, algumas vezes referido como rendimento específico (S_y), definido como o volume de água a ser drenado do meio poroso saturado sob a influência da gravidade, dividida pelo volume total do meio poroso.

O rendimento específico é sempre menor que a porosidade porque alguma umidade sempre ficará retida devido às forças capilares. Após a drenagem cessar, o volume de água retido em um aquífero, por unidade de área horizontal e unidade de variação do nível de água, é chamado retenção específica (S_r). Assim:

$$n = S_y + S_r \quad (5)$$

Por essa razão, S_y é algumas vezes referido como porosidade efetiva. O rendimento específico varia com a profundidade do nível de água do aquífero e com a variação do tamanho dos grãos. Sob certas condições, o rendimento específico também é dependente do tempo de drenagem, tendendo a um valor limite (BEAR, 2012).

Permeabilidade, Condutividade e Transmissividade

Permeabilidade (k) [L^2] é a capacidade de um material em transmitir fluido na presença

de um gradiente de energia. A permeabilidade depende do arranjo e forma dos grãos no meio poroso, sendo portanto intrínseca ao meio, não dependendo da natureza do fluido que se move através desse. Já a condutividade hidráulica (K) [$L \cdot T^{-1}$] depende de características do meio poroso (k), propriedade do fluido (ρ e μ), além de fatores externos (g). Assim K é dado por:

$$K = (k\rho g) / \mu \quad (6)$$

Transmissividade (T) [$L^2 \cdot T^{-1}$] é definido como o produto da espessura saturada (Δz) do aquífero pela condutividade hidráulica:

$$T = \Delta z K \quad (7)$$

3.2.3 Escoamento subterrâneo

Lei de Darcy

A lei de Darcy é uma relação empírica, a qual estabelece que a taxa de fluxo através do meio poroso é proporcional ao gradiente de energia do fluido (DEMING, 2002). Considerando dois pontos (P1 e P2), tendo entre si uma distância L , com cargas hidráulicas ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente, a descarga específica (q) [$L \cdot T^{-1}$] entre esses pontos é dada por:

$$q = -K(\phi_2 - \phi_1) / L \quad (8)$$

Onde K é a condutividade hidráulica do meio. Mais formalmente, considerando as direções x , y e z e o meio isotrópico e homogêneo, a descarga específica é dado por:

$$\vec{q} = -K \text{grad} \phi = -K \vec{\nabla} \phi \quad (9)$$

Em várias situações é conveniente a obtenção da descarga ocorrendo ao longo da espessura saturada do aquífero, ao invés da descarga específica. Assim, considerando h a distância do nível freático em relação a base de um aquífero não confinado, têm-se:

$$Q_x = h q_x = h \left(-K \frac{\partial h}{\partial x} \right) = -K \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^2}{2} \right) \quad (10)$$

$$Q_y = h q_y = h \left(-K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = -K \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^2}{2} \right) \quad (11)$$

Equação de Boussinesq

Figura 1 - Conservação da massa em um aquífero freático. Fonte: Adaptado de Delleur (2006).

Considera-se o volume de controle, centrado ao redor do ponto (x, y) , com lados Δx e Δy , estendendo-se da base impermeável até a superfície do solo, como mostrado na Figura 1. Note que o volume de controle inclui a zona não saturada, porque o fluxo de água subterrâneo e, em particular, as mudanças resultantes da elevação do nível freático terão efeito sobre o balanço na zona não saturada, o que devemos levar em conta.

Realizando o balanço de massa, obtém-se:

$$\begin{aligned} & [\rho Q_x(x - \Delta x/2, y, t) - \rho Q_x(x + \Delta x/2, y, t)] \Delta y + \\ & [\rho Q_y(x, y - \Delta y/2, t) - \rho Q_y(x, y + \Delta y/2, t)] \Delta x + \\ & \rho R(x, y, t) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (12)$$

Onde $R(x, y, t)$ [L,T] é a recarga através da superfície superior. Usando a expansão da

série de Taylor, o balanço de massa do volume de controle torna-se:

$$\left(-\frac{\partial \rho Q_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho Q_y}{\partial y} + \rho R \right) \Delta x \Delta y \quad (13)$$

Esta equação deve ser balanceada pela variação do armazenamento. O montante de água em massa, M , presente no volume de controle, é variável porque a posição do nível freático não é fixa no tempo, e parte da zona saturada pode se tornar não-saturada, ou vice-versa. Logo, a mudança no armazenamento é dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \Delta x \Delta y \int_b^s \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \quad (14)$$

Onde θ é o conteúdo de umidade do meio poroso. Sabendo que o conteúdo residual de água no solo é dado pela retenção específica (S_r), a diferença volumétrica no armazenamento pode ser calculado como:

$$\int_b^s \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \int_b^s \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)}{\Delta t} \right] dz = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[(n - S_r) \frac{\Delta h}{\Delta t} dz \right] \quad (15)$$

Aplicando o limite em (15), obtém-se:

$$\int_b^s \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = (n - S_r) \frac{\partial h}{\partial t} = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16)$$

Onde S_y é o rendimento específico, S_r a retenção específica e n a porosidade. Combinando as equações 13, 14 e 16 e dividindo por $\rho \Delta x \Delta y$ tem-se:

$$\left(-\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y} + R \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17)$$

Por fim, substituindo as equações 10 e 11 em 17, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18)$$

Esta é a equação de fluxo de um aquífero freático homogêneo e isotrópico com base horizontal impermeável. Essa é chamada a Equação de Boussinesq (DELLEUR, 2006).

3.3 Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani – SAG é a unidade hidrogeológica da bacia sedimentar do Paraná/Chaco-Paraná formada por arenitos de origem eólica e depósitos flúvio-lacustres que ocorrem sob os derrames de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (RABELO; WENDLAND, 2009). O SAG é composto por duas unidades sedimentares, a Formação Botucatu (período Jurássico) e Pirambóia (período Triássico). Essas estão cobertas por uma camada de basaltos da Formação Serra Geral (período Cretáceo Superior) e também por camadas sedimentares do Grupo Bauru (SRACEK; HIRATA, 2002). Embora sejam diferentes, as formações Pirambóia e Botucatu são frequentemente estudadas juntas por causa da dificuldade de distingui-las, especialmente no contexto hidrogeológico (HIRATA et al., 2011).

O SAG encontra-se localizado no centro-sul da América do Sul (Figura 2), possuindo um volume de água estimado em $57 \times 10^{12} \text{ m}^3$ e área de aproximadamente $1.195.500 \text{ km}^2$, cuja extensão no Brasil é da ordem de 839.800 km^2 ; 225.500 km^2 na Argentina; 71.700 km^2 no Paraguai e 58.500 km^2 no Uruguai (ARAUJO; FRANCA; POTTER, 1999). No Brasil, o SAG ocorre nos Estados do Mato Grosso do Sul (213.200 km^2), Rio Grande do Sul (157.600 km^2), São Paulo (155.800 km^2), Paraná (131.300 km^2), Goiás (55.000 km^2), Minas Gerais (51.300 km^2), Santa Catarina (49.200 km^2) e Mato Grosso (26.400 km^2) (ARAUJO; FRANCA; POTTER, 1999).

Figura 2 - Extensão do SAG na América do Sul. Fonte: Adaptado de Hoeyng et al. (2014).

O SAG é essencialmente um aquífero confinado ou semi-confinado com 10% de área de afloramento (Figura 3) (RABELO; WENDLAND, 2009). No estado de São Paulo, o SAG ocorre em cerca de 60% de seu território, sendo livre em aproximadamente 15.500 km^2 e predo-

minantemente confinado por derrames de rochas basálticas em 140.220 km² (90% da sua área de ocorrência no estado) (SILVA et al., 2008). As áreas de afloramento, onde o aquífero é livre, embora correspondam a apenas 10% da área total, devido sua elevada conexão hidráulica com a zona não saturada, são áreas que exibem alta vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas (FOSTER et al., 2009).

Entre os poços localizados no SAG, os de maior produção de água estão no estado de São Paulo. Vários poços fornecem mais de 600 m³.h⁻¹ (167 L.s⁻¹) e 150 m³.h⁻¹ (42 L.s⁻¹) em áreas onde o aquífero é confinado e não-confinado, respectivamente (HIRATA et al., 2011). A recarga do SAG, em São Paulo, é limitada as zonas de afloramento e várias janelas estratigráficas (conexão direta do SAG com o Grupo Bauru devido a inexistência de rochas vulcânicas) encontradas, pelo menos, em Bauru, Araraquara e São Carlos (HIRATA et al., 2011).

Figura 3 - Áreas de Afloramento e confinamento do SAG. Fonte: Ribeiro (2008).

3.3.1 Características hidrogeológicas

As propriedades hidrogeológicas do SAG variam significativamente e resultam do ambiente de deposição dos arenitos, sua evolução estrutural e o tempo de residência das águas. De modo geral, a porosidade do Botucatu é maior do que do Pirambóia, assim como a condutividade hidráulica. Isso se deve aos altos níveis de argilosidade do Pirambóia, se comparado ao Botucatu (ARAÚJO; FRANCA; POTTER, 1999).

Gomez, Rodriguez e Vives (2010) estimaram a condutividade hidráulica (K), realizando teste de bombeamento em 24 poços, na fronteira Uruguai-Brasil, nas cidades de Rivera (Uruguai) e Santana do Livramento (Brasil), em uma área de afloramento do SAG com cerca de 750 km². Os valores de K variaram de 0,12 a 5,76 m.dia⁻¹ ($1,4 \times 10^{-6}$ a $6,7 \times 10^{-5}$ m.s⁻¹). De acordo com Araujo, Franca e Potter (1999), para toda a extensão do SAG, os valores médios de K são 1,9 m.dia⁻¹ e 8,7 m.dia⁻¹ ($2,2 \times 10^{-5}$ e $1,0 \times 10^{-4}$ m.s⁻¹) para a Formação Pirambóia e Botucatu, respectivamente. Segundo Hirata et al. (2011), os valores médios de K do SAG variam entre 2 e 15 m.dia⁻¹ ($2,3 \times 10^{-5}$ e $1,7 \times 10^{-4}$ m.s⁻¹), com uma média de 13 m.dia⁻¹ ($1,5 \times 10^{-4}$ m.s⁻¹).

No Estado de São Paulo, K varia de $2,0 \times 10^{-6}$ a $1,9 \times 10^{-3}$ m.s⁻¹, média de $1,5 \times 10^{-4}$ m.s⁻¹, para as formações Botucatu e Pirambóia (SRACEK; HIRATA, 2002). Também para o Estado de São Paulo, combinando medidas de campo e laboratório, Hoeyng et al. (2014) construíram um modelo de alta resolução do SAG, através do qual obteve valor médio de K igual a $1,36 \times 10^{-4}$ m.s⁻¹. Em estudo realizado para avaliar a exploração do SAG em Araraquara, Hirata et al. (2012) verificaram que K variava entre $0,9 \times 10^{-5}$ e $4,1 \times 10^{-6}$ m.s⁻¹.

O coeficiente de armazenamento (S) médio na zona livre foi estimado em 0,25 para a Formação Botucatu e de 0,15 a 0,20 para a Formação Pirambóia. Já na zona confinada, foram encontrados valores entre 10^{-3} a 10^{-5} para ambas as formações (DAEE, 1974). Gomes (2008) coletou amostras indeformadas de solo em vários pontos da Bacia do Ribeirão da Onça (BRO), localizada na cidade de Brotas-SP, obtendo valores médios de S, para os sedimentos do cenozoico, entre 0,085 e 0,159. Hirata et al. (2011) resumiram os valores dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados para o SAG no estado de São Paulo (Tabela 1).

É importante observar que muitas estimativas da condutividade hidráulica em estudos do Aquífero Guarani não consideram a correção da densidade e viscosidade em função da temperatura. A água do aquífero confinado extraída do SAG chega à superfície com temperaturas de 40°C a 80°C (REBOUÇAS; ARMORE, 2002). Para temperatura de 60°C, por exemplo, se o valor da viscosidade e da densidade não forem corrigidos, a estimativa da condutividade hidráulica pode estar superestimada em até 70% (SRACEK; HIRATA, 2002).

Tabela 1 - Características hidráulicas do SAG no Estado de São Paulo.

Fonte: [Hirata et al. \(2011\)](#).

Parâmetros Hidrodinâmicos	Formação Pirambóia	Formação Botucatu
Condutividade hidráulica (m.dia^{-1})	2,5 (0,5 - 3,0)	3,5 (2,0-4,0)
Coefficiente de armazenamento (ad)	1.10^{-5} - 1.10^{-3}	
Porosidade (ad)	0,15 (0,20 - 0,30)	0,25 (0,20 - 0,40)
Porosidade efetiva (ad)	0,15 (0,10 - 0,30)	

Média (máximo – mínimo)

3.4 Recarga Subterrânea

3.4.1 Terminologia

A recarga é definida como um fluxo de água descendente que atinge o aquífero, somando-se ao armazenamento subterrâneo ([HEALY, 2010](#)). Nesta definição não está incluso o fluxo de água de um aquífero adjacente. [Healy \(2010\)](#) refere-se a esse como fluxo inter-aquíferos. A recarga é usualmente expressa como um fluxo volumétrico, em termos de volume por unidade de tempo [$\text{L}^3.\text{T}^{-1}$], como $\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$, ou em termos de volume por unidade de área superficial e por unidade de tempo [L.T], como mm.ano^{-1} .

Figura 4 - Mecanismos de recarga direta e indireta. Fonte: Adaptado de [Healy \(2010\)](#).

A recarga pode ocorrer através de mecanismos com escala difusa ou concentrada. A recarga que é distribuída sobre grandes áreas em resposta à precipitação é conhecida como recarga difusa. Esta também é referida como recarga direta ([DE VRIES; SIMMERS, 2002](#)). A recarga concentrada consiste no movimento de água vindo de corpos d'água superficiais, como rios, canais ou lagos, sendo essa também conhecida como recarga indireta ([LERNER, 2002](#)).

Os aquíferos recebem tanto a recarga direta quanto a indireta, embora a importância de cada mecanismo varie de região para região, ou mesmo de local para local em uma mesma região. De modo geral, a recarga direta é predominante em regiões úmidas, ao passo que em regiões áridas a recarga indireta tende a ser mais relevante (SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

Infiltração é a passagem de água da superfície do solo para a subsuperfície. Essa parcela da precipitação pode ser vista como uma recarga potencial, visto que essa poderá se tornar recarga ou não, permanecendo armazenada na zona não saturada ou retornando para a atmosfera através da evapotranspiração. Outro termo importante para o estudo da recarga é o plano de fluxo nulo (PFN). O PFN é um plano horizontal que separa o movimento ascendente do movimento descendente da água, coincidindo algumas vezes com a parte inferior da zona de raízes. A água movida para baixo do PFN, na zona não saturada, é referida como drenagem, percolação ou infiltração líquida. Essa se torna realmente recarga quando atinge o nível freático (HEALY, 2010).

3.4.2 Modelo Conceitual do Processo de Recarga

Figura 5 - Modelo conceitual do processo de recarga. Fonte: Adaptado de Healy (2010).

O modelo conceitual do processo de recarga (Figura 5) é muito importante em qualquer estudo de recarga, isto porque o modelo conceitual é a ideia básica de como o sistema ou processo funciona.

Vários fatores podem influenciar o desenvolvimento do modelo conceitual – clima, topografia, geologia, hidrologia e uso do solo. Pelo esquema da Figura 5, para a construção do modelo conceitual é importante a identificação de todos os fluxos superficiais e subterrâneos e

como eles interagem. Essa interação é analisada pelo balanço hídrico aplicado ao aquífero ou mesmo à bacia hidrográfica. O balanço hídrico é fundamental em qualquer modelo conceitual porque provê uma ligação entre o processo de recarga e os outros processos do ciclo hidrológico. Além disso, provê informações não somente da recarga, mas também da inter-relação entre recarga, descarga e variação de armazenamento.

Segundo [Bredehoeft \(2005\)](#), o modelo deve ser desenvolvido no início do estudo, podendo ser revisado e ajustado, adicionando novas análises e dados, provendo nova percepção do sistema hidrológico. No processo de revisão e ajuste do modelo, o trabalho de campo desempenha papel fundamental, em decorrência da possibilidade de se encontrar no campo um processo, antes não identificado ou mesmo pensado, havendo necessidade de revisar o modelo conceitual. Assim, esse deve ser visto como um processo iterativo, o qual é continuamente reformulado e melhorado.

3.4.3 Fatores que influenciam a recarga subterrânea

Vários são os fatores que influenciam a recarga subterrânea, dentre os quais pode-se destacar o clima, solo, geologia, vegetação e uso do solo.

O clima desempenha papel deveras importante no controle da recarga, como mostram as diferenças na fonte e nas taxas de recarga entre regiões úmidas e áridas. Regiões áridas tendem a ser dominadas pelo mecanismo de recarga indireta, com níveis freáticos profundos e com o rio alimentando o aquífero. Regiões úmidas, ao contrário, apresentam-se com aquíferos rasos que alimentam a vazão dos rios. Sendo função do clima, a variabilidade da precipitação também é importante. Tendências sazonal, anual e de longo período da precipitação, bem como a intensidade, duração e frequência de eventos individuais de precipitação podem afetar a recarga ([HEALY, 2010](#)).

O tipo de uso do solo exerce profunda influência sobre o processo de recarga. Como observado no item 3.1, o tipo e densidade da vegetação têm influência sobre os padrões de evapotranspiração. Florestas, de modo geral, apresentam maiores taxas de evapotranspiração que gramíneas, como pastagem. O manejo da cultura também é importante para a recarga. Em áreas agrícolas, os sulcos podem criar barreiras ao escoamento superficial, aumentando assim a infiltração e portanto a recarga potencial. A irrigação em excesso, nessas áreas, pode recarregar artificialmente o aquífero. Em regiões áridas ou semiáridas, onde a recarga natural é baixa, esse tipo de fonte de recarga pode produzir montante significativo de água ([FISHER; HEALY, 2008](#)).

A permeabilidade e textura do solo também são muito importantes no processo de recarga por que, geralmente, solos com granulometria grossa apresentam maiores taxas de infiltração que solos com granulometria fina. Embora os sedimentos com textura fina sejam menos permeáveis, tendem a ter maior capacidade de armazenamento de água.

3.4.4 Desafios na estimativa da recarga

Estimativa acurada da recarga subterrânea é sempre desejada. No entanto, infelizmente, no estado atual da ciência, é extremamente difícil de avaliar a acurácia dos métodos (HEALY; COOK, 2002). O problema resulta do fato dos fluxos de recarga não poderem ser medidos diretamente, e portanto os diferentes métodos existentes tentam estimar indiretamente, o que pode acarretar em erros na estimativa da recarga.

A incerteza e erros na estimativa da recarga provêm de muitos fatores, incluindo: disponibilidade de dados confiáveis, aplicação de um modelo conceitual inválido, variabilidade espacial e temporal ignorada, erros de medida e de cálculo (HEALY, 2010; SOMARATNE; SMETTEM; FRIZENSCHAF, 2014). Este problema tende a crescer porque os diferentes processos de recarga podem ocorrer simultaneamente, como a presença, em uma região úmida, de grandes lagos e rios. Assim, além da recarga devido à infiltração da água no solo, a recarga devido à interação rio-aquífero seria muito importante no processo. Taylor e Greene (2008) enfatizam a importância de serem identificadas as fontes de recarga direta e indireta em qualquer estudo.

Como a maioria dos erros associados com a estimativa da recarga não é quantificável, é sensata a aplicação de múltiplos métodos para estimar a recarga em qualquer estudo. Em muitos casos, o uso de diferentes métodos contribui para o aperfeiçoamento do modelo conceitual do processo de recarga. Esta afirmação pode ser comprovada por Sophocleous (1991), o qual mostrou que a combinação dos métodos do balanço hídrico no solo e da variação da superfície livre proporcionaram resultados melhores e mais confiáveis do que se esses fossem aplicados independentemente. Além disso, a consistência entre a estimativa dos diferentes métodos leva a supor que as estimativas são válidas, e a inconsistência entre as estimativas pode ser indicativo de erros de medida ou hipóteses erradas, levando à revisão do modelo conceitual. Entretanto, o uso de múltiplos métodos com resultados consistentes, pode não ser um confiável indicador da acurácia dos métodos (SOMARATNE; SMETTEM; FRIZENSCHAF, 2014).

Outro limitante importante à estimativa da recarga é o custo financeiro. Alguns métodos podem ser aplicados por meio de uma única ida ao campo para coletar e analisar amostras de solo e água, como no caso de traçadores; outros métodos requerem monitoramento contínuo ao longo de anos ou mais. Embora os custos de análises químicas sejam elevados, podem se mostrar atrativos quando comparados aos métodos que requerem monitoramento contínuo. Também é preciso ter em mente que “mais caro” nem sempre significa “melhor e mais acurado” (HEALY, 2010).

3.4.5 Métodos de estimativa de recarga

Vários métodos têm sido utilizados para estimar a recarga de aquíferos, os quais produzem estimativas em várias escalas de tempo e espaço, além de abranger complexidades e custos diversos, a depender do método. Considerando o sistema hidrológico, do qual as informações foram obtidas, os métodos podem ser agrupados em três zonas (Tabela 2): saturada, não-saturada e de águas superficiais. Em cada um desses grupos, os métodos podem ser classificados como: físico, traçador e de modelo computacional (SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

Tabela 2 - Técnicas para estimar recarga em regiões com clima árido, semiárido e úmido.

Fonte: adaptado de Scanlon, Healy e Cook (2002).

Zonas	Métodos	
	Clima árido e semiárido	Clima úmido
Água superficial	Balanço hídrico em canal	Balanço hídrico em canal
	Medidores de infiltração	Medidores de infiltração
	Traçadores de calor	Escoamento de base
	Traçadores isotópicos	Traçadores isotópicos
	Modelagem de bacias	Modelagem de bacias
Não-saturada	Lisímetros	Lisímetros
	Plano de fluxo nulo	Plano de fluxo nulo
	Lei de Darcy	Lei de Darcy
	Traçadores históricos e ambientais	Traçadores aplicados
	Modelagem numérica	Modelagem numérica
Saturada	-	Variação do nível freático
	-	Lei de Darcy
	Traçadores históricos e ambientais	Traçadores históricos
	Modelagem numérica	Modelagem numérica

Informações sobre os diferentes métodos estão contidas em referências como Simmers (1988), Lerner, Issar e Simmers (1990), Scanlon, Healy e Cook (2002) e Healy (2010). A escolha dos métodos depende dos objetivos e da precisão esperada dos resultados, dimensão dos sistemas e das condições hidrogeológicas do local (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007). Como exemplo de objetivos que motivam a estimativa de recarga pode-se citar (HEALY, 2010):

- Obtenção de taxas médias de recarga a longo prazo para um aquífero;
- Estimativas pontuais de recarga no espaço para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero;
- Estimativa de recarga em pontos específicos no tempo e no espaço para calibração de modelos durante a simulação combinada entre águas superficiais e escoamento de águas subterrâneas;

- Avaliação dos efeitos das mudanças no uso do solo e mudanças climáticas (no passado e futuro) sobre os padrões de recarga.

Porque muitas técnicas são baseadas na equação do balanço hídrico, este tópico será descrito inicialmente, antes da apresentação dos principais métodos aplicados a zona saturada. Esses serão priorizados nesse trabalho porque, como será mais amplamente explicado no item Materiais e métodos, a zona saturada é a principal fonte de dados do presente trabalho de pesquisa.

3.4.5.1 Balanço hídrico

O primeiro passo na análise do balanço hídrico é a seleção de um ou mais volumes de controle para o estudo. O volume de controle pode ser a Terra, a atmosfera ou uma estrutura hidrológica como uma coluna de solo, um lago ou rio, um aquífero ou uma bacia hidrográfica. Conhecimento sobre a hidrologia do sistema é útil na seleção de um volume de controle. Onde e quando a recarga ocorre, quando a recarga é direta ou indireta, quais tipos de dados estão disponíveis, são considerações importantes na seleção do volume de controle (HEALY, 2010).

Considerando uma coluna de solo (figura 6), que se estende até uma profundidade L , como volume de controle, o balanço hídrico pode ser realizado pela equação 19:

$$P = ET + \Delta S + R_{off} + D \quad (19)$$

Onde P é precipitação; ET é evapotranspiração; ΔS é a variação de armazenamento de água na coluna; R_{off} é o runoff e D é a drenagem. A drenagem é equivalente a recarga, R , somente se a base da coluna se estender até o nível freático.

Assim como aplicado a uma coluna de solo, o balanço hídrico pode ser aplicado, de modo simplificado, a uma bacia hidrográfica:

$$P + Q_{on} = ET + Q_{off} + \Delta S \quad (20)$$

Onde, P é precipitação (e pode também incluir irrigação); Q_{on} e Q_{off} são o fluxo de água que entra e sai da bacia, respectivamente; ET é evapotranspiração; e ΔS é a variação de armazenamento de água.

Cada componente dessa equação pode ser escrita em função dos seus subcomponentes. O fluxo de água que entra na bacia (Q_{on}) pode ser escrita como a soma do fluxo de água superficial (Q_{on}^{sw}) e o fluxo de água subterrâneo (Q_{on}^{gw}). O fluxo que sai da bacia (Q_{off}) pode ser dividido no fluxo de água subterrânea (Q_{off}^{gw}), o qual inclui a extração de água por poços, o escoamento

Figura 6 - Balanço hídrico em uma coluna de solo. Fonte: Adaptado de (HEALY, 2010).

superficial (R_o) e o fluxo de base (Q^{bf}). A ET é subdividida segundo a fonte de evaporação da água - superfície (ET^{sw}), zona saturada (ET^{gw}) e não-saturada (ET^{uz}). Já o armazenamento de água (ΔS) toma lugar nos reservatórios de água superficial (ΔS^{sw}), zona saturada (ΔS^{gw}) e não-saturada (ΔS^{uz}). Assim, para uma bacia hidrográfica (Figura 7), reescrevendo a equação 20 do balanço hídrico para incorporar esses subcomponentes, resulta em (SCANLON; HEALY; COOK, 2002):

$$P + Q_{on}^{sw} + Q_{on}^{gw} = ET^{sw} + ET^{gw} + ET^{uz} + R_o + Q_{off}^{gw} + Q^{bf} + \Delta S^{sw} + \Delta S^{gw} + \Delta S^{uz} \quad (21)$$

Esta equação pode ser refinada, se necessário. Para algumas bacias hidrográficas, muitos desses termos serão negligenciáveis devido à magnitude e, portanto, podem ser ignorados.

Vários dos parâmetros descritos nesta seção são também componentes do balanço hídrico de aquíferos. Considerando a equação do balanço hídrico aplicada a um aquífero, pode-se verificar que as mudanças no armazenamento de água desse podem ser atribuídas a recarga e o fluxo entre aquíferos menos o escoamento de base, a evapotranspiração da água subterrânea e o fluxo para fora da bacia (SCHICHT; WALTON, 1961). Assim, o balanço (Equação 21) pode ser escrito como:

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw} \quad (22)$$

Figura 7 - Corte de uma bacia hidrográfica com as componentes do balanço hídrico.

Fonte: Adaptado de [Healy \(2010\)](#).

Onde R é recarga, ΔS^{gw} é a mudança no armazenamento do aquífero, Q^{bf} é o escoamento de base, ET^{gw} é a evapotranspiração da água subterrânea, e $Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw}$ é a diferença entre o fluxo que sai e entra no aquífero e inclui as extrações por bombeamento. Todos os termos das equações 19, 20, 21 e 22 são expressos como taxas volumétricas por unidade de área superficial (ex. mm.ano^{-1}). A equação 22, ou alguma variante dessa, é muito utilizada para estimar recarga, obtendo essa como o residual da equação.

Uma vantagem da equação do balanço hídrico é a flexibilidade, o que permite ser aplicada sobre uma grande faixa de escalas de tempo e espaço, variando em sua aplicação de lisímetros a modelos climáticos globais. A principal limitação da abordagem residual é que a acurácia da estimativa da recarga depende da acurácia com a qual as outras componentes da equação do balanço hídrico são mensuradas ([SCANLON; HEALY; COOK, 2002](#)).

3.4.5.2 Método de Darcy

A lei de Darcy pode ser usada para estimar o fluxo através da seção transversal de um aquífero confinado ou não confinado. Este método considera que o escoamento se dá em regime permanente e que não há extração de água. A descarga específica ou velocidade de Darcy (q) é calculada como o produto da condutividade hidráulica pelo gradiente hidráulico. Assim, o

fluxo volumétrico através de uma seção transversal vertical (A) de um aquífero é igual à taxa de recarga (R) multiplicada pela área superficial (B) que contribui para o fluxo (SCANLON; HEALY; COOK, 2002):

$$qA = RB \quad (23)$$

Esta abordagem requer a estimativa da condutividade hidráulica saturada (K_s) e do gradiente hidráulico. A determinação de K_s e do gradiente hidráulico pode ser problemática e de elevado custo. Além disso, K_s é altamente variável no espaço. Logo, o método de Darcy aplicado à zona saturada é limitado à habilidade de se determinar valores representativos de K_s (HEALY, 2010).

3.4.5.3 Método da variação da superfície livre

O método da variação da superfície livre (*Water Table Fluctuation*, WTF) baseia-se na hipótese de que a recarga do aquífero livre é inteiramente atribuída à elevação do seu nível freático (HEALY; COOK, 2002).

Assim, considerando um intervalo de tempo, Δt , pequeno o suficiente para que essa premissa seja válida, a recarga é expressa como (DELIN et al., 2007):

$$R(t_j) = S_y \Delta H(t_j) \quad (24)$$

Onde $R(t_j)$ é a recarga que ocorre entre os tempos t_0 e t_j , S_y é o rendimento específico do aquífero, e $\Delta H(t_j)$ é a diferença entre o pico da curva de ascensão e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, extrapolada até o instante do pico (Figura 8).

A equação (24) assume que a água que atinge o nível freático contribui rapidamente para o armazenamento e que todas as outras componentes da equação (22) são nulas durante o período de recarga. O método considera a existência de um tempo de defasagem entre a chegada da água até o nível freático, durante um evento de recarga, e a sua distribuição para as outras componentes da equação (22). Assim, se o método WTF for aplicado durante esse tempo de defasagem, toda a água que contribui para a recarga poderá ser contabilizada (HEALY, 2010). Esta hipótese é válida, principalmente, para curtos períodos de tempo (horas a poucos dias), sendo este intervalo o mais apropriado para a aplicação do método (HEALY; COOK, 2002).

Segundo Healy (2010), a equação (24) também pode ser usada para calcular a variação do armazenamento (*net change*) para intervalos de tempo maiores (sazonal ou anual). Essa variação do armazenamento é determinada por meio da substituição de ΔH na equação (24) por ΔH_n , o qual corresponde à diferença de carga hidráulica entre o final e o início do intervalo de

Figura 8 - Hidrógrafa de um poço de monitoramento. Fonte: Adaptado de Healy (2010).

tempo considerado.

A dificuldade na aplicação do método WTF está relacionada com a determinação de um valor representativo para S_y e a garantia de que a flutuação nos níveis de água do aquífero é devida à recarga e não como resultado de mudanças na pressão atmosférica, a presença de ar aprisionado, ou outro fenômeno, como bombeamento (SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

3.4.5.4 iWTF

O método da variação da superfície livre (WTF), como observado na seção anterior, é uma abordagem simples e muito fácil de aplicar, sendo um dos métodos mais populares para estimar recarga subterrânea. A simplicidade desta abordagem é também sua principal crítica: o fluxo lateral e os eventos isolados de recarga ocorrendo durante o declínio do nível de água dos poços são mal contabilizados (WENDLAND; BARNES, 2015). Com o objetivo de preencher essa lacuna, Wendland e Barnes (2015) desenvolveram um método melhorado baseado na flutuação do nível de água (*improved water table fluctuations*, iWTF), o qual avalia explicitamente o fluxo lateral.

A equação utilizada no método iWTF foi desenvolvida a partir da equação de Bousinesq (item 3.3.3). Essa equação foi desenvolvida considerando o aquífero não-confinado, isotrópico e homogêneo, tendo uma camada horizontal e impermeável como base (Figura 9). Considerando que o fluxo esteja ocorrendo predominantemente na direção x , a partir da equação

Figura 9 - Aquífero freático, entre dois longos rios paralelos, em condição não permanente.

Fonte: [Wendland e Barnes \(2015\)](#).

de Boussinesq, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (25)$$

dividindo ambos os lados da equação pela condutividade hidráulica (K) e aplicando a regra da cadeia tem-se ([WENDLAND; BARNES, 2015](#)):

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{R}{K} = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (26)$$

Onde, a recarga vertical, $R(t,x)$ [$L.T^{-1}$], e a altura no nível freático, $h(t,x)$ [L], variam ambos no tempo e espaço. A condutividade hidráulica K [$L.T^{-1}$], e o rendimento específico [ad], são os parâmetros do aquífero que controlam o processo de fluxo.

Para encontrar a solução da equação 26, [Wendland e Barnes \(2015\)](#) considerou que a distribuição do nível de água podia ser aproximada por uma função quadrática:

$$[h(t,x)]^2 \approx Ax^2 + Bx + C \quad (27)$$

Diferenciando a equação 27 com relação a x e substituindo o resultado na equação 26, conclui-se que:

$$A \approx \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R}{K} \quad (28)$$

ou equivalentemente,

$$R \approx S_y \frac{\partial h}{\partial t} - AK \quad (29)$$

Na equação 29, o primeiro termo representa a recarga que contribui para o armazenamento e o segundo corresponde ao montante de recarga que contribui para o fluxo lateral. Segundo [Wendland e Barnes \(2015\)](#), $\partial h / \partial t$ pode ser aproximado por diferenças finitas a $\Delta h / \Delta t$, e o parâmetro 'A', em função do tempo, pode ser obtido resolvendo um sistema de três equações lineares. Assim:

$$A(t) = a_1[h(t, x_1)]^2 + a_2[h(t, x_2)]^2 + a_3[h(t, x_3)]^2 \quad (30)$$

Onde os coeficientes a_1, a_2, a_3 são constantes que dependem da distância entre os poços utilizado.

$$a_1 = (x_2 - x_3)/D \quad a_2 = (x_3 - x_1)/D \quad a_3 = (x_1 - x_2)/D \quad (31)$$

Como foi utilizado uma função quadrática, para a aplicação do método é necessária a utilização de três poços.

O método do iWTF apresenta vantagens se comparado ao WTF tradicional: a extrapolação subjetiva da curva de recessão antecedente, como requirida pelo WTF, não é necessária; o fluxo lateral é avaliado de acordo com a equação geral de fluxo; a variação de armazenamento no aquífero pode ser calculada para diferentes períodos de tempo; a parcela da recarga (recarga profunda) que atinge a base do aquífero pode ser estimada. Como desvantagens do método pode-se citar: a necessidade de pelo menos três poços de monitoramento ao longo da linha de corrente; a dependência de determinação prévia do rendimento específico e da condutividade hidráulica do aquífero ([WENDLAND; BARNES, 2015](#)).

3.4.6 Métodos para determinação da K

A determinação da condutividade hidráulica (K) pode ser feita com métodos de correlação ou com métodos hidráulicos (Figura 10). Os métodos hidráulicos podem ser divididos em dois grupos, os métodos de laboratório e os métodos de campo ([RITZEMA, 1994](#)).

Figura 10 - Visão geral dos métodos usados para determinar a condutividade hidráulica.

Fonte: Adaptado de [Ritzema \(1994\)](#).

Métodos hidráulicos

Métodos hidráulicos são baseados na imposição de certas condições de fluxo no solo e aplicando uma fórmula apropriada baseada na Lei de Darcy e nas condições de contorno do fluxo.

Os métodos hidráulicos, em laboratório, são aplicados sobre amostras indeformadas de solo, podendo usar amostras coletadas na horizontal ou vertical, para mensurar a condutividade hidráulica horizontal (K_h) e vertical (K_v), e a diferentes profundidades. Em laboratório, as amostras são saturadas com água e submetidas a uma carga hidráulica constante ou variável. Embora a aplicação desse método seja trabalhosa, é relativamente rápida e barata, e elimina as incertezas envolvidas em relação a certas propriedades do solo para o valor de K ([RITZEMA, 1994](#)).

Em contraste aos métodos hidráulicos de laboratório, que determinam o valor de K a partir de amostras de solo com dimensões fixas, os métodos de campo usualmente determinam o valor de K ao redor de um furo feito no solo, tal que os limites do corpo do solo investigado não é precisamente conhecido ([RITZEMA, 1994](#)). Os métodos de campo podem ser divididos em métodos de pequena escala e de grande escala.

Dentro dos métodos de campo para pequena escala, os valores de K podem ser determinados diretamente na zona saturada, na zona não saturada ou superfície do solo. Neste último,

Figura 11 - Slug Test e Bail Test. Fonte: Adaptado de Fetter (2001).

o solo não está saturado. Para mensurar a condutividade hidráulica, deve-se primeiro aplicar água de forma a obter condição próximo a saturada. Esses métodos são chamados ‘métodos de infiltração’ e usam a relação entre as taxas de infiltração medida e carga hidráulica para calcular o valor de K (DINGMAN, 2002).

No caso da zona saturada, um método muito utilizado é o teste de slug. Neste teste é aplicada uma carga ou descarga através da introdução ou remoção súbita de um sólido de volume conhecido dentro do poço (Figura 11), de forma que o nível de água seja elevado ou rebaixado. Quando o volume é adicionado, o teste é conhecido como “slug test”, caso contrário é chamado “bail test” (OLIVA; CHANG; CAETANO-CHANG, 2005). A partir do monitoramento do nível de água no poço, é obtido uma curva de rebaixamento ou recuperação, com o tempo. Desta curva são extraídos os parâmetros que, juntamente com as características geométricas do poço, fornecem o valor da condutividade hidráulica (FETTER, 2001).

Os métodos de pequena escala não são aplicáveis a grandes profundidades, e portanto os seus resultados não são representativos de aquíferos profundos, sendo mais adequados para aquíferos rasos (RITZEMA, 1994).

Os métodos de campo para maiores escalas são projetados para obter um valor representativo de K para grandes extensões. Esses métodos são mais caros e consomem mais tempo que os métodos anteriores, mas são mais confiáveis (RITZEMA, 1994). Como exemplo dessa categoria pode-se citar o teste de bombeamento. Informação detalhada sobre teste de bombeamento pode ser encontrada em Fetter (2001).

Métodos de correlação

Nem sempre é possível a realização de testes de permeabilidade em laboratório ou campo, os quais consomem mais tempo e dinheiro que os métodos de correlação. Métodos de correlação são usados para estimar a condutividade hidráulica através de uma ou mais das seguintes propriedades do solo: textura, porosidade, curva de distribuição granulométrica (CDG), massa específica, conteúdo de argila e matéria orgânica (CHAPUIS, 2012; RITZEMA, 1994). Os melhores métodos são aqueles que levam em conta: (1) a porosidade n ou o índice de vazios e ; (2) alguma característica relacionada ao tamanho dos grãos ou à superfície específica; (3) somente testes realizados com amostras totalmente saturadas; (4) apenas testes realizados em amostras que não são propensas a erosão interna (CHAPUIS, 2012).

Entre os quase cinquenta métodos desenvolvidos até os dias atuais, sete tendem a apresentar melhores resultados e portanto serão apresentados abaixo (CHAPUIS, 2012; BETHKE, 1985):

Hazen (1892) unida com Taylor (1948)

A equação de Hazen (1892) é aplicada para areias pouco uniformes, com coeficiente de uniformidade $C_U \leq 5$ e um diâmetro equivalente d_{10} entre 0,1 e 3,0 mm. Se alguma das condições não é satisfeita, a equação de Hazen perde em acurácia.

$$K_s(\text{cm/s}) = 1,157 \left(\frac{d_{10}}{1 \text{ mm}} \right)^2 \left[0,70 + 0,03 \left(\frac{T}{1^\circ\text{C}} \right) \right] \quad (32)$$

Taylor (1948) propôs uma equação expressa como:

$$K_s(e) = A \frac{e^3}{1+e} \quad (33)$$

Na Eq. 33, o coeficiente A (mesma unidade de K_s) tem um valor específico para cada tipo de solo. O valor de A pode ser obtido de um primeiro conjunto de valores experimentais (e , K_s). Unindo ambas as equações anteriores é possível excluir o valor de A da Eq 33. Assim:

$$\frac{K_s(e)}{K_s(\text{Hazen})} = \left(\frac{e^3}{e_{\max}^3} \right) \left(\frac{1+e_{\max}}{1+e} \right) \quad (34)$$

Terzaghi (1925)

Terzaghi (1925) propôs, para areia, que:

$$K_s(\text{cm/s}) = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right) d_{10}^2 \quad (35)$$

onde a constante C_0 é igual a 8,0 para grãos arredondados e 4,6 para grãos com forma

irregular, é μ_{10} , μ_T e a viscosidade dinâmica da água a 10 °C e a uma temperatura T, respectivamente.

Kozeny-Carman

A equação pode ser representada da seguinte forma:

$$K_s = C \frac{g}{\mu_w \rho_w} \frac{e^3}{S_s^2 G_s^2 (1 + e)} \quad (36)$$

Onde C é uma constante que depende da geometria dos poros, g é a aceleração da gravidade (m.s^{-2}), μ_w , a viscosidade dinâmica da água (Pa.s), ρ_w , a massa específica da água (kg.m^{-3}), ρ_s , a massa específica dos sólidos (kg.m^{-3}), G_s , a razão entre as massas específicas ($G_s = \rho_s / \rho_w$), S_s , a superfície específica e, e, o índice de vazios. Segundo (CHAPUIS, 2012) a equação 36 é válida para areias (baixa plasticidade), mas não para argilas (alta plasticidade).

Chapuis e Aubertin (2003), depois de analisar a equação 36, concluíram que essa pode ser utilizada para qualquer solo, plástico ou não-plástico, sob a seguinte forma:

$$\log(K_s) = 0,5 + \log \left(\frac{e^3}{G_s^2 S_s^2 (1 + e)} \right) \quad (37)$$

Na Eq. 37, K_s está em m.s^{-1} , S_s em $\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$, e G_s é adimensional.

Navfac DM7 (1974)

O gráfico de Navfac-DM7 (1974), *Naval Facilities Engineering Command - Design Manual 7.01*, estima o K_s como função de e e d_{10} , sob cinco condições: (1) areia ou uma mistura de areia e pedregulho, (2) $2 \leq C_U \leq 12$, (3) $d_{10}/d_5 \leq 1,4$, (4) $0,1 \leq d_{10} \text{ (mm)} \leq 2 \text{ (mm)}$, e (5) $0,3 \leq e \leq 0,7$.

$$K_s(\text{cm/s}) = 10^{1,291e - 0,6435} (d_{10})^{10^{0,5504 - 0,2937e}} \quad (38)$$

Assim como nos outros métodos, se todas as condições não forem satisfeitas o método perderá em acurácia.

Shahabi et al. (1984)

Shahabi, Das e Tarquin (1984), a partir de amostras de areia, desenvolveram a seguinte equação:

$$K_s(\text{cm/s}) = 1,2 C_U^{0,735} d_{10}^{0,89} \frac{e^3}{1 + e} \quad (39)$$

A aplicação desta equação requer a verificação de quatro condições: (1) areia, (2) $1,2 \leq C_U \leq 8$, (3) $0,15 \leq d_{10} \text{ (mm)} \leq 0,59 \text{ (mm)}$, e (4) $0,38 \leq e \leq 0,73$.

Mbonimpa et al. (2002)

Para solos com baixa plasticidade, [Mbonimpa et al. \(2002\)](#) propôs:

$$K_s(\text{cm/s}) = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} C_U^{1/3} d_{10}^2 \frac{e^{3+x}}{1+e} \quad (40)$$

É importante observar que para a Eq. 40, d_{10} está em cm. Além disso, $C_G=0,1$, $\gamma_w=9,8 \text{ kN.m}^{-3}$, $\mu_w \approx 10^{-3} \text{ Pa.s}$, e $x=2$.

Chapuis (2004)

Este método pode ser usado para solos não-plásticos, incluindo solo siltoso.

$$K_s(\text{cm/s}) = 2,4622 \left(\frac{d_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \quad (41)$$

Boa predição é obtida para solos naturais com as seguintes faixas, $0,003 \leq d_{10} \text{ (mm)} \leq 3 \text{ (mm)}$ e $0,3 \leq e \leq 1,0$ ([CHAPUIS, 2004](#)).

Como observado acima, alguns métodos de correlação necessitam da superfície específica (S_s) da amostra para a sua aplicação. Um método para estimar S_s para solos não-plásticos foi proposto por [Chapuis e Légaré \(1992\)](#). Se d é o diâmetro (m) de uma esfera ou o lado de um cubo sólido de massa específica $\rho_s \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$, $S_s \text{ (m}^2\text{.kg}^{-1}\text{)}$ de um grupo de esferas ou cubos é dado por:

$$S_s(d) = \frac{6}{\rho_s} \sum \frac{P_{N_o.D} - P_{N_o.d}}{d} \quad (42)$$

Onde $(P_{N_o.D} - P_{N_o.d})$ é a percentagem de massa sólida menor do que o tamanho D ($P_{N_o.D}$), e maior que o próximo tamanho d ($P_{N_o.d}$). A aplicação da equação 42 requer o uso da curva de distribuição granulométrica para o solo em estudo.

Também existem métodos que estimam a permeabilidade, ao invés da condutividade hidráulica. [Bethke \(1985\)](#) usou um modelo generalizado para estimar a permeabilidade em termos da porosidade para areias:

$$\log(k_x) = -13 + 12n \quad (43)$$

Onde n é a porosidade ($0 < n < 1$) e k_x a permeabilidade paralela ao plano de repouso da rocha (m^2). Associando essa com a equação 6 é possível estimar a condutividade hidráulica.

3.4.7 Métodos para determinação de S_y

O rendimento específico (S_y), também conhecido como porosidade efetiva (para aquífero não-confinado), é definido como o volume de água a ser drenado do meio poroso saturado sob a influência da gravidade, dividida pelo volume total do meio poroso. Vários métodos são utilizados para determinar o rendimento específico, sendo divididos em métodos laboratoriais e métodos de campo.

Figura 12 - Esquema de aparelho para determinação do rendimento específico em laboratório.

Fonte: [Gomes \(2008\)](#).

No laboratório, S_y é usualmente determinado mensurando a retenção específica e a porosidade e aplicando a equação 5. O método consiste em saturar uma coluna preenchida com uma amostra indeformada de sedimento (Figura 12), sendo posta a drenar sob a ação da gravidade até atingir a capacidade de campo (equivalente à retenção específica) ([GOMES, 2008](#); [JOHNSON; PRILL; MORRIS, 1963](#)). Segundo [Cassel e Nielsen \(1986\)](#), a capacidade de campo para solos com textura grossa é melhor representada pelo conteúdo volumétrico de água a uma pressão de -10 kPa , ao passo que para solos com textura fina esse valor é cerca de -33 kPa . O Funil de Haines, ou Funil de placa porosa, é um equipamento útil para encontrar a umidade retida em uma amostra de solo após a aplicação de uma determinada sucção ([LIBARDI, 2005](#)).

O tempo de drenagem pode exercer um grande efeito sobre os valores calculados de retenção e rendimento específico. A altura da coluna também é importante. Uma coluna mais curta que a altura da franja capilar, provavelmente, produzirá valores de S_y menores que a obtida em uma coluna maior que a altura da franja ([HEALY, 2010](#)).

No campo, o teste de bombeamento em aquíferos é o método tradicional para estimar S_y e outras propriedades do aquífero. Neste método, poços de observação são localizados a diferentes distâncias do poço em que será realizado o teste. A relação entre o declínio do nível

de água vs. o tempo dos poços de observação são relacionados com curvas tipo teóricas para gerar estimativas de S_y (MOENCH, 1994; NEUMAN; WITHERSPOON, 1972). O método apresenta algumas desvantagens. A interpretação dos resultados não é única e a validade das hipóteses inerente à técnica é difícil de verificar. Custo também é importante ao utilizar essa técnica; a instalação de poços de bombeamento e de observação pode ser um limitante em muitos estudos de recarga (HEALY, 2010).

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Bacia do Ribeirão da Onça

4.1.1 Localização e Clima

A área de estudo está localizada na Bacia do Ribeirão da Onça, a qual tem aproximadamente 6500 ha (65 km²) de área, localizada no município de Brotas, no centro-leste do Estado de São Paulo, entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste e os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul (Figura 13). Uma característica importante da bacia é estar inteiramente localizada em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.

Figura 13 - Localização da área de estudo - Bacia do Ribeirão da Onça.

Fonte: Modificado de [Guanabara \(2011\)](#).

A partir de dados obtidos na estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) verificou-se que a média e desvio padrão, de longo período (35 anos), da precipitação anual (setembro - agosto) é 1494 ± 239 mm, com o mínimo ocorrendo no inverno (julho - 28 mm) e o máximo no verão (janeiro - 291 mm).

A temperatura do ar diária média é $20,6 \pm 3,1$ °C, variando entre 10 e 29 °C. Conforme a classificação climática de Köppen, a área em estudo possui clima subtropical úmido com inverno seco e verão chuvoso.

4.1.2 Caracterização física

A Figura 14 apresenta a variação de altitude na bacia do ribeirão da onça, assim como seus cursos d'água e área de drenagem. Esse mapa foi construído a partir de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e visitas a campo, sendo útil para caracterizar a fisiografia da bacia (Tabela 3).

Figura 14 - Altimetria da Bacia do Ribeirão da Onça.

Uma boa indicação do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia é através da densidade de drenagem (D_d), dada pela razão entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem. Pelos dados da Tab. 3, obteve-se $D_d=0,77 \text{ km.km}^{-2}$. Como esse valor está entre $0,75$ e $1,5 \text{ km.km}^{-2}$, verifica-se que a bacia é medianamente drenada (VILLELA; MATTOS, 1975).

Com relação à forma da bacia, é possível analisar a susceptibilidade da ocorrência de inundações nas partes baixas, através do índice de compacidade (k_c), o qual é dado pela relação entre o perímetro da bacia e o perímetro da circunferência de área igual à da bacia. Obteve-se

Tabela 3 - Caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão da Onça.

CARACTERÍSTICAS DA BACIA	
Área de drenagem	64,7 km ²
Perímetro	40,8 km
Comprimento axial	11,4 km
Extensão do curso d'água principal	15,0 km
Comprimento total dos cursos d'água	50,0 km
Altitude máxima	844 m
Altitude mínima	642 m
Declividade média	8,0 m.km ⁻¹

$k_c=1,42$, o que indica baixa suscetibilidade da bacia a ocorrência de enchentes. Isso porque, quanto mais próximo da unidade for este valor, mais a forma da bacia se aproxima de uma circunferência, e portanto o escoamento superficial tende a convergir para um determinado trecho do rio principal, levando a ocorrência de enchentes.

4.1.3 Geologia e Pedologia

Figura 15 - Mapa geológico na região da bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: [Castro Júnior \(2008\)](#).

Em relação aos aspectos geológicos, a bacia possui rochas originadas tanto da Formação Botucatu e Piramboa, quanto da Formação Serra Geral (Figura 15). A Formação Piramboa foi verificada por [Castro Júnior \(2008\)](#) através da ocorrência de arenitos finos a médios com elevado

teor de argila, bem como de arenitos grossos, conglomeráticos.

A Formação Botucatu foi observada sobre as colinas pela presença de areias quartzosas, com textura semelhante aos grãos de quartzo que constituem os arenitos eólicos, tendo sido provavelmente retrabalhados por processos cenozoicos de coluvionamento. Já a Formação Serra Geral está presente na seção exutória, na forma de rochas básicas de origem intrusiva, configurando um dique de diabásio (CASTRO JÚNIOR, 2008). Os tipos de solos também são descritos por Castro Júnior (2008), estando agrupados em 5 tipos pedológicos principais (Figura 16):

- Areias Quartzosas Profundas;
- Latossolo Vermelho-Amarelo álica;
- Latossolo Roxo eutrófico;
- Terra Roxa Estruturada distrófica ou eutrófica;
- Solos Hidromórficos;
- Latossolo Vermelho-Escuro distrófico ou álico.

Figura 16 - Mapa pedológico na região da bacia do Ribeirão da Onça.

Fonte: Castro Júnior (2008).

4.1.4 Uso e Ocupação do solo

A BRO é utilizada para práticas agrícolas e pecuária, sendo utilizada também para o plantio florestal. A bacia está incluída dentro do núcleo de produção florestal Itirapina (SP6), da Suzano Papel e Celulose (Suzano Papel e Celulose (2014)), possuindo quase 40% de sua área dedicada a plantações de eucalipto. A bacia tem no cerrado a sua cobertura original, estando, atualmente (Figura 17), coberta por eucaliptos (36%), citrus (23%), cana (10%), mata (10%), soja (7%), pastagem (6%), solo nu (8%).

Figura 17 - Mapa de uso do solo na Bacia do Ribeirão da Onça para 2014 .

Por possuir diferentes usos do solo, e estar constantemente sofrendo mudanças de cultura, a bacia está exposta a fontes potenciais de contaminação decorrente de atividades agrícolas, como a aplicação de fertilizantes, herbicidas e pesticidas. Estes últimos são práticas comuns, principalmente nas plantações de citros (laranja e limão).

Na BRO, poços de monitoramento estão presentes em quase todos os usos do solo, exceto em área de soja. Esses foram instalados, entre outros motivos, para avaliar o impacto da

mudança de uso do solo sobre o aquífero. Recentemente ocorreu mudança de uso do solo na área de citrus, tendo parte de sua área sido substituída por cana de açúcar (Figura 18f).

(a) Cana

(b) Eucalipto

(c) Citrus

(d) Pastagem

(e) Mata

(f) Mudança de uso

Figura 18 - Tipos de Uso do Solo na BRO.

Figura 19 - Localização das áreas de estudo na Bacia do Ribeirão da Onça.

Fonte: Imagem do Google Earth, acessado em 12/01/2015.

4.2 Descrição dos Sites

Dois são os *sites* em estudo neste trabalho de pesquisa (Figura 19). O *site* 1, com aproximadamente 45 ha (0,45 km²), centrado nas coordenadas -22,185 S, -47,952 O, localizado na fazenda Monte Alegre, começou a ser monitorada afim de avaliar a recarga subterrânea, o efeito da mudança de uso do solo e a contribuição para o fluxo subterrâneo na escala de bacia. Os solos através do site são predominantemente areia quartzosa profunda, cujo conteúdo de argila foi encontrado menor que 8% no perfil de 1,0 m de profundidade (Tabela 4).

Tabela 4 - Textura do solo no perfil de 1,0 m de profundidade.

Profundidade	Textura (g.kg ⁻¹)					
	Site 1			Site 2		
	areia	argila	silte	areia	argila	silte
0,30	935	50	15	948	25	27
0,60	909	75	16	960	25	16
1,00	907	75	18	-	-	-
Média	917	67	16	954	25	22

Até o ano de 2011, o uso do solo predominante na área era a pastagem, para fins de alimentação bovina. A partir de 2012, o uso do solo mudou para plantação de clones de eucaliptos híbridos (*E. grandis* x *E. urophylla*), também conhecido como 'Urograndis'. A densidade média da plantação é 1334 árvores por hectare, com um espaçamento médio de 2,5 x 2,5 m².

Figura 20 - Folhas, tronco e semente do Urograndis.

O *site 2* está localizado na fazenda Goiabal, estando centrado nas coordenadas -22,244 S, -47,961 O. Assim como o primeiro *site*, os solos são predominantemente areia quartzosa, com vestígios de argila e silte. Embora haja diferentes usos do solo na fazenda, no entorno da área de monitoramento predomina a pastagem para fins de pecuária.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Seleção dos métodos

Segundo Healy (2010), a seleção dos métodos de estimativa de recarga deve levar em consideração fatores como: objetivo do estudo; dados existentes; variabilidade temporal e espacial da recarga (recarga direta ou indireta?); considerações sobre o tempo (qual o intervalo de tempo de interesse? média de longo período, anual ou mensal?) e espaço (a estimativa deve ser feita para um aquífero ou para uma bacia hidrográfica?), além de limitações em relação ao tempo de monitoramento e custo envolvido.

Como descrito na subseção 4.2, foram selecionados dois *sites* na BRO. Estes foram escolhidos, inicialmente, em função do objetivo geral de projeto, que é avaliar o impacto da mudança de uso do solo, de pastagem para eucalipto, sobre o nível d'água monitorado em poços. Neste caso, é no *site* 1 que é possível verificar essa mudança de uso do solo, a partir de 2012. As informações relevantes para a escolha dos métodos são:

- **Tipo de recarga** - assim como em toda a bacia, observa-se que na área de estudo a recarga é direta, por ser devida somente à precipitação;
- **Disponibilidade de dados** - durante os últimos 10 anos, o nível de água em poços da área foram regularmente monitorados. A partir dessas informações é possível inferir que a zona subsuperficial de interesse é a zona saturada;
- **Considerações sobre tempo** - a estimativa da recarga deve ser realizada em intervalo diário, mensal ou anual para possibilitar comparações entre os períodos pré e pós mudança de uso do solo;
- **Considerações sobre local** - a estimativa de recarga deve ser realizada para o aquífero da área de interesse.

A partir dessas informações optou-se por utilizar os métodos aplicados à zona saturada (Tabela 2) para regiões úmidas, que forneçam estimativas locais, a saber: o método de Darcy e o método de variação da superfície livre (WTF). No caso deste último, foi utilizado a sua versão melhorada desenvolvida por Wendland e Barnes (2015), o iWTF. Esses fazem uso de dados como espessura saturada, condutividade hidráulica e rendimento específico do aquífero. Diferenças entre os métodos, como escala de tempo e espaço, tipo de recarga e fonte de obtenção dos dados podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Diferença entre os métodos usados para a estimativa da recarga subterrânea.

Fonte: Modificado de Healy (2010).

Método	Tipo de recarga		Escala temporal	Escala espacial	Estimativa de recarga	Fonte de dados
	Direta	Indireta				
WTF	X		Evento/dia, semanal ou sazonal	10-100 m ²	Total	Zona saturada
Darcy	X	X	Evento/dia, semanal, sazonal ou anual	1-100 m ²	Total	Zona saturada

“Evento/dia” é referente ao período de tempo que pode ser menor, mas não maior que um dia.

5.2 Coleta de dados

5.2.1 Monitoramento do nível freático

O monitoramento da variação do nível freático é realizado em 23 poços distribuídos em toda a bacia. Entre esses, 05 estão localizados nos *sites* em estudo e foram utilizados no presente trabalho de pesquisa. Os poços 16, 17, 18, 19 estão localizados no *site* 1 e o poço 05 está localizado no *site* 2 (Figura 21).

Figura 21 - Localização dos poços de monitoramento.

Todos esses piezômetros são monitorados desde 2004, e atualmente estão disponíveis 10

anos hidrológicos (setembro a agosto) de dados de níveis d'água. Os poços de monitoramento foram instalados, paralelos a uma linha de corrente, com tubo de cloreto de polivinila (PVC) com 100 mm de diâmetro, filtro variando entre 4 e 10 m de comprimento e pré-filtro preenchido com areia grossa. Dados como cota, profundidade, nível máximo e mínimo monitorados em cada poço podem ser visualizado na Tabela 6.

O nível de água nos poços são monitorados a cada 15 dias com um medidor elétrico de nível de água (Hidrosuprimentos Ltda). Os valores medidos são interpolados linearmente no tempo de modo a obter uma série diária de valores. Mais recentemente, transdutores de pressão (Mini-Diver, Schlumberger Ltd.) estão monitorando os níveis, automaticamente, duas vezes por dia. As flutuações barométricas são compensadas usando dados de pressão coletados por um transdutor de pressão (Baro-Diver, Schlumberger Ltd.).

Tabela 6 - Características dos poços de monitoramento.

Poços	Diferença entre a boca do poço e a superfície do solo (m)	Profundidade do poço (m)	Cota (m)	H _{max} (m)	H _{min} (m)	ΔH _{max} (m)	Comprimento do filtro (m)
05	0,99	45,70	754,00	9,04	4,57	4,47	10
16	0,37	22,00	709,90	7,45	3,16	4,29	04
17	0,39	26,00	719,72	14,67	7,33	7,34	06
18	0,57	29,00	726,13	18,65	9,25	9,40	08
19	0,41	32,00	730,00	19,02	9,29	9,73	08

H: Profundidade do nível d'água.

5.2.2 Monitoramento da precipitação

Os dados de precipitação foram coletados com um pluviômetro tipo *ville de Paris* na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da USP, localizada nas coordenadas 22,170 S e 47,898 O (Figura 19). Os dados de precipitação e outras informações meteorológicas (temperatura, radiação, pressão, umidade, direção e velocidade do vento) também são monitoradas pela Estação Ambiental Automática ou Plataforma de Coleta de Dados (PCD), estando os dados disponíveis no endereço eletrônico ³ do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Além dos dados disponíveis no CRHEA, atualmente tem-se duas Estações Meteorológicas Automáticas (fabricante Campbell) dentro da bacia do Ribeirão da Onça, que foram insta-

³ <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/dados.php?id=31973&map=yes>.

ladas com o objetivo de melhorar a representatividade espacial dos dados meteorológicos, entre eles a precipitação. Uma das estações, está localizada na fazenda Monte Alegre (*site* 1) e está em funcionamento desde junho/2011. Ambas as estações estão programadas para realizarem medidas horárias.

A Agência Nacional das Águas (ANA) possui pluviômetros próximos à bacia, os quais, embora estejam fora da bacia, são importantes fontes de dados para os trabalhos realizados na BRO. Entre essas tem-se a estação do Ribeirão do Feijão (Código ANA - 2247182), localizada nas coordenadas 22,133 S e 47,887 O, a estação Fazenda Campo Alegre (2247185), nas coordenadas 22,147 S e 48,001 O, ambas monitoradas desde 1977. Tem-se também a estação Usina do Lobo (2247008), posicionada nas coordenadas 22,167 S e 47,900 O, monitorada desde 1937. Essas estações estão a 2,30, 10,88 e 0,45 km do CRHEA⁴, respectivamente.

5.3 Estimativa do Rendimento específico

Para a aplicação do método iWTF faz-se necessário o valor do rendimento específico (S_y). [Gomes \(2008\)](#) realizou campanhas de coleta de amostras indeformadas de solo em diferentes pontos da bacia do Ribeirão da Onça (Figura 22) e em diferentes profundidades, possibilitando a determinação do rendimento específico através do teor de umidade do solo, por meio do Funil de Haines.

O rendimento específico foi determinado para as várias profundidades (Tabela 7) em cinco diferentes locais da bacia, sendo que dois desses estão presentes no *site* 1 (PCA 02 e 03), e outro (PCA 05) no *site* 2. Assim, serão adotados os valores de S_y obtidos para esses pontos de coleta.

Tabela 7 - Valores de S_y para diferentes pontos de coleta. Fonte: [Gomes \(2008\)](#).

Pontos de coleta de amostras de solo (PCA)					
PCA 2		PCA 3		PCA 5	
Prof. (m)	S_y (%)	Prof. (m)	S_y (%)	Prof. (m)	S_y (%)
3,00	15,40	6,10	12,40	4,40	16,80
4,00	15,20	7,10	12,40	5,40	15,70
4,50	14,70	8,40	8,90	6,00	15,10
-	-	9,30	10,40	-	-
-	-	-	-	-	-
Média (%):	15,10	Média (%):	11,00	Média (%):	15,90
Desvio (%):	0,36	Desvio (%):	1,70	Desvio (%):	0,86

⁴ Distância obtida através do Google earth.

Figura 22 - Pontos de coleta de amostras indeformadas de solo na BROA. Fonte: [Gomes \(2008\)](#).

5.4 Estimativa da condutividade hidráulica

A aplicação dos métodos de Darcy e iWTF requer um valor representativo da condutividade hidráulica saturada (K_s). Como abordado no item 3.4.6, para a zona saturada, o teste de *slug* e o teste de bombeamento estão entre os mais utilizados, sendo o último considerado o mais confiável.

Embora esses métodos apresentem grandes vantagens, a sua aplicação neste trabalho de pesquisa mostrou-se inviável. Os poços de monitoramento foram construídos com um pré-filtro composto por areia grossa. Como o teste de *slug* fornece um valor de K_s localizado, característico da matriz do solo no entorno dos poços, não é adequado a aplicação desse, visto que o valor de K_s seria fortemente influenciado pelo pré-filtro, sendo portanto não representativo da geologia da área de estudo. No caso do teste de bombeamento, o custo elevado foi um dos principais limitantes à sua aplicação na área.

Assim, optou-se por utilizar o método da correlação por ser de baixo custo e de fácil aplicação. Entre as diferentes equações apresentadas no item 3.4.6, foram utilizadas as equações propostas por [Terzaghi \(1925\)](#), [Bethke \(1985\)](#), [Mbonimpa et al. \(2002\)](#) e [Chapuis \(2004\)](#). Todos os métodos são aplicados a amostras com elevado teor de areia (baixa plasticidade). Para a aplicação dos métodos, foram utilizados valores do diâmetro efetivo (d_{10}) obtidos das curvas de distribuição granulométrica (Anexo A) construídas por [Gomes \(2008\)](#) de amostras indeformadas, coletadas nos *sites* em estudo para diferentes profundidades (H), além dos dados de porosidade (n) obtidos em laboratório para cada amostra.

5.5 Aplicação dos métodos

5.5.1 Variação dos níveis

A avaliação do impacto da mudança de cultura sobre o aquífero foi realizada, inicialmente, analisando a variabilidade dos níveis d'água, monitorados em poços, segundo consta em [Zhou et al. \(2002\)](#). Inicialmente, a avaliação foi realizada utilizando os poços 16 e 05. Como abordado no item 5.2, o poço 16 está localizado no *site* 1, onde foi plantado eucalipto em substituição à pastagem, em 2012, e o poço 05 está presente no *site* 2, coberto por pastagem desde 2004. A ideia por trás dessa análise é avaliar se essa variação, em relação a média histórica dos níveis em cada poço, é estatisticamente significativa. O procedimento para a aplicação pode ser dividida nas seguintes etapas:

- i) Cálculo da média histórica dos níveis em cada poço;
- ii) Cálculo da média mensal ou anual para o período com pastagem e eucalipto;
- iii) Cálculo da diferença entre os valores obtidos nos itens anteriores.

A aplicação dessa metodologia entre os *sites* requer a utilização de piezômetros que apresentem características semelhantes em termos dos parâmetros que controlam a variação dos níveis. Entre esses, o rendimento específico foi identificado como uma das propriedades mais importantes. Pela Tabela 7, verifica-se que o rendimento na área dos poços 16 e 05 foi encontrado, utilizando amostras indeformadas, próximo de 15% em ambos. Embora as profundidades dos poços sejam diferentes, os níveis máximo, mínimo e a diferença entre esses também são muito próximos (Tabela 6). Portanto, esses poços foram escolhidos para esta etapa do trabalho. A equação 44 ilustra a aplicação do método entre os poços 16 e 05.

$$[\text{Variação do nível freático}] = [\text{Média mensal ou anual}] - [\text{Média histórica}] \quad (44)$$

Onde o termo "média histórica" refere-se à média dos níveis de todo período de monitoramento (2004-2014) em cada poço. Essa metodologia também foi aplicada para os poços 19, 18, 17 e 16, localizados no *site* 1, com o intuito de comparar os períodos pré (2004-2011) e pós (2012-2014) mudança de uso do solo, tendo sido necessário a utilização de metodologia para minimizar o efeito do clima sobre a variação dos níveis. Neste caso foi utilizado a precipitação mensal média ou precipitação anual do período de estudo para normalizar os dados. A equação 45 ilustra a aplicação do método para os poços do *site* 1.

$$[\text{Variação do nível freático}] = \frac{[\text{Média mensal ou anual}] - [\text{Média histórica}]}{\text{Precipitação mensal média ou anual}} \quad (45)$$

5.5.2 Aplicação do iWTF

Para a estimativa da recarga, foram utilizados duas abordagens. A primeira é o *improved water table fluctuation* (iWTF). Como comentado anteriormente, para a aplicação desse método, faz-se necessária informação sobre a condutividade hidráulica saturada (K_s) e o rendimento específico (S_y). Visto que o modelo matemático a ser aplicado (equação 29), foi desenvolvido considerando a hipótese de que a distribuição do nível de água pode ser aproximada por uma função quadrática, devem ser utilizados três piezômetros. Para os *sites* em estudo, essa condição é somente satisfeita na fazenda Monte Alegre e, portanto, a metodologia será aplicada apenas neste *site*. Neste caso foram escolhidos os poços 19, 18 e 17 para sua aplicação.

Figura 23 - Esquema de representação dos poços de observação na BRO.

Além dos valores de S_y para cada poço, para a estimativa da variação de armazenamento, o valor médio de K_s e a espessura saturada diária, são necessários para o cálculo do fluxo lateral. Para esse último, é necessária a obtenção da cota da base do aquífero. O aquífero em estudo possui uma camada de arenito, do cenozoico, que embora apresente uma baixa condutividade, não é impermeável. Essa constitui-se na base do aquífero (Figura 23). Após observação em campo, verificou-se que o valor médio da cota é 697 m (WENDLAND; BARNES, 2015). A aplicação do iWTF segue os seguintes passos:

- Cálculo da espessura saturada para cada poço, em relação a cota da base do aquífero;
- Estimativa da variação de armazenamento, como o produto da variação diária do nível freático pelo rendimento específico em cada poço;
- Estimativa do fluxo lateral médio, através do produto da condutividade hidráulica média

pelo parâmetro 'A' (equação 30), obtido com a espessura saturada e a distância de cada poço em relação ao ribeirão da onça;

- d) Estimativa da recarga profunda, para o período de estiagem, aplicando o balanço hídrico a cada piezômetro;
- e) Cálculo da recarga direta (R) através da soma da variação de armazenamento(ΔS), fluxo lateral (FL) e recarga profunda (R_p) (Figura 24).

Figura 24 - Balanço hídrico em poço.

É importante observar que embora, usualmente, seja utilizado um valor médio de rendimento específico para cada poço, esse tende a variar em função da flutuação do nível freático (HEALY, 2010). Em decorrência da variação acentuada do nível d'água devido a mudança do uso do solo, o rendimento específico pode ter-se modificado significativamente após a mudança de cobertura do solo. Entretanto, devido as limitações do presente trabalho de pesquisa serão utilizados os mesmos valores de S_y para todo o período de monitoramento, os quais foram estimados a partir dos dados da Tabela 7. Informações sobre a distância dos poços em relação ao rio, S_y e K_s médio estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados utilizados na aplicação do iWTF.

Poços	Distância do ribeirão * (m)	Rendimento específico (%)	Condutividade hidráulica (m/s)
17	294,64	14	7×10^{-6}
18	385,84	10	
19	566,55	10	

* Distância obtida através do Google Earth.

5.5.3 Aplicação do método de Darcy

Figura 25 - Balanço hídrico entre poços.

A segunda abordagem utilizada para estimar a recarga direta foi o método de Darcy. Esse, como proposto em [Scanlon, Healy e Cook \(2002\)](#), dado pela equação 23, estima a recarga direta através da diferença de fluxo entre dois piezômetros, de modo que o fluxo volumétrico através de uma seção transversal de um aquífero é igual à taxa de recarga multiplicada pela área superficial que contribui para o fluxo. Analisando a equação $qA = RB$, percebe-se que a estimativa da recarga é realizada em função apenas do fluxo lateral. Após várias tentativas de aplicar esse método na área de estudo, percebeu-se que esse necessitava considerar, além do fluxo lateral (qA), a variação de armazenamento entre os poços (ΔS). Assim, considerando a largura unitária, realizando o balanço hídrico entre dois poços (Figura 25), obtém-se:

$$R = (q_b E_b - q_a E_a) / L + \Delta S \quad (46)$$

Onde $q_b E_b$ e $q_a E_a$ são o produto da descarga específica pela espessura saturada calculadas para os poços de jusante e montante, respectivamente; ΔS é a variação de armazenamento, o qual é estimado entre os poços, R a recarga direta e L a distância entre os poços na superfície. Embora o método, como apresentado pela Equação 46, não faça uso apenas da equação de Darcy na estimativa da recarga direta, neste trabalho, o termo "método de Darcy" continuará sendo utilizado para se referir à estimativa das componentes da Equação 46.

Para a aplicação do método de Darcy, faz-se necessária a utilização de pelo menos 3 poços, onde cada par de piezômetros são utilizados para o cálculo de um valor de descarga

específica. Neste caso foram escolhidos os poços 18, 17 e 16 para sua aplicação. Diferente do iWTF, o método de Darcy requer, para a estimativa do fluxo lateral, o valor de K_s para cada poço utilizado. Esses foram estimados segundo os valores da Tabela 12, sendo $7,00 \times 10^{-6}$ e $1,17 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ para os poços 18 e 17, respectivamente.

Usualmente, a variação de armazenamento é obtida através do produto do rendimento específico (S_y) pela diferença de carga hidráulica (ΔH_n) entre o final e o início de um intervalo de tempo considerado (equação 24). A diferença de carga hidráulica é, normalmente, calculada para um determinado poço. Como o interesse é estimar a variação de armazenamento entre os poços 18 e 17, optou-se, portanto, por utilizar o valor médio do nível freático diário dos poços 18 e 17. De forma semelhante, foram utilizados os valores médios de S_y para os poços em questão (Tabela 8). Assim, a variação de armazenamento entre os poços 18 e 17 foram estimados a partir do produto da flutuação diária do nível freático médio pelo rendimento específico médio entre os poços.

5.6 Índice Meteorológico de Seca

Considerando que a recarga direta varia em função da precipitação do período, fez-se necessária a classificação dos anos hidrológicos de modo a verificar a existência de anos secos e chuvosos, além do normal para a região. Para tal, optou-se por utilizar o Índice padronizado de precipitação (*Standardized Precipitation Index*, SPI), o qual é um índice meteorológico de seca utilizado para quantificar o déficit de precipitação em diferentes escalas temporais: 1, 2, 3, 6, 9, 12... meses, que refletem o impacto da seca na disponibilidade hídrica (HUNT et al., 2014). O cálculo do SPI para qualquer local é baseado em séries longas de precipitação. Informação detalhada sobre o SPI pode ser encontrada em Hayes et al. (1999). Estimativa do SPI de 1979-1980 a 2013-2014, ano hidrológico (setembro a agosto), estão presentes no Apêndice G.

Tabela 9 - Escala de classificação para o SPI. Adaptado de Hayes et al. (1999).

SPI	Categoria
2,00 ou maior	Extremamente úmido
1,50 a 1,99	Muito úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente úmido
-0,99 a 0,99	Normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Severamente seco
-2,00 ou menor	Extremamente seco

5.7 Análise estatística

A análise estatística foi realizada, inicialmente, entre os *sites* 1 e 2, sabendo que nesse experimento tem-se 2 grupos independentes entre si (poços diferentes). A análise foi realizada entre os anos hidrológicos 2005 a 2011, período no qual os *sites* estavam cobertos por pastagem, e 2012 a 2014, em que os *sites* 1 e 2 estavam cobertos por eucalipto e pastagem, respectivamente. Esses usos do solo serão considerados na análise estatística como tratamentos. A análise foi realizada entre os poços 16 e 05 considerando que ambos apresentam características semelhantes. De modo a se analisar um número de réplicas maior, optou-se por utilizar os valores médios mensais de cada tratamento. Como ambos os tratamentos compartilham do mesmo intervalo de tempo e condições climáticas, os dados não foram normalizados pela precipitação. Nessa foi utilizado o teste t para dois grupos independentes.

A segunda etapa consistiu na análise dos dados produzidos no *site* 1, visto que neste é onde ocorre a transição de cultura. Como se trata de comparações entre dois tratamentos (período de pastagem e eucalipto) em uma mesma área e poços, pode-se inferir que se trata de dois tratamentos pareados, sendo utilizado o teste t pareado. Nesta análise, foram utilizados valores médios mensais, entretanto, normalizados pela precipitação mensal média do período correspondente. É importante lembrar que para aplicar o teste t, é necessário que os dados tendam a normalidade. Para verificar a condição de normalidade dos dados foram utilizados os testes de Shapiro-Wilk e Anderson Darling. Onde as condições de normalidade não foram encontradas, os testes não paramétricos correspondentes foram utilizados, a saber: teste Mann-Whitney, ou Wilcoxon. A análise estatística fora realizada segundo consta em [Montgomery e Runger \(2010\)](#). As variáveis analisadas foram a variabilidade do nível, fluxo lateral, variação de armazenamento e a recarga direta. A análise estatística para cada variável pode ser verificada no Apêndice A.

6 RESULTADOS

6.1 Variabilidade da Precipitação

A partir de dados de precipitação obtidos no CRHEA (Tabela 10) pode-se verificar que a média da precipitação anual (setembro - agosto) e desvio padrão é 1478 ± 219 mm, com média mínima ocorrendo no inverno (agosto, 28,5 mm) e média máxima no verão (janeiro, 319 mm). Observa-se que o período de maior ocorrência da precipitação, com mais de 70% do total anual, é entre setembro e março. O período de estiagem abrange os meses de abril a agosto, sendo caracterizado pela baixa ocorrência de precipitação.

Tabela 10 - Precipitação mensal e anual para os anos hidrológicos de 2005 a 2014.

Mês	Precipitação anual (mm)										Média
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
setembro	38,9	85,0	53,6	0,7	38,5	105,2	71,7	0,4	95,3	70,2	56,0
outubro	125,9	84,8	113,3	183,8	111,2	149,2	75,9	150,4	128,5	167,9	129,1
novembro	167,7	110,3	127,2	140,2	106,3	248,4	142,2	119,1	77,9	199,2	143,9
dezembro	182,5	215,9	391,6	126,1	202,2	331,7	234,8	316,5	295,3	129,2	242,6
janeiro	542,3	180,2	356,2	270,2	275,0	255,1	573,8	345,5	286,3	105,6	319,0
fevereiro	69,0	263,0	240,8	194,4	232,8	165,4	208,4	152,9	162,2	166,5	185,5
março	155,2	162,5	92,5	191,0	157,5	149,5	282,5	61,9	134,2	148,6	153,5
abril	13,1	24,4	95,6	98,6	44,5	82,6	163,6	166,4	95,5	56,4	84,1
maio	87,9	15,7	62,0	70,6	14,4	24,1	4,8	75,5	155,2	61,5	57,2
junho	41,5	18,3	13,7	17,4	28,0	29,4	48,3	166,4	71,6	1,5	43,6
julho	4,3	28,5	161,4	0,0	64,7	30,7	0,3	23,4	13,1	24,4	35,1
agosto	16,1	20,1	0,0	63,0	122,0	0,0	55,8	0,0	2,2	6,1	28,5
Total anual	1444,4	1208,7	1707,9	1356,0	1397,1	1571,3	1862,1	1578,4	1517,3	1137,1	1478,0

Durante os últimos dez anos pode-se perceber a ocorrência de três anos atípicos. Os anos hidrológicos de 2006 e 2014, com total anual igual a 1208,7 e 1137,1, foram os anos mais secos dos dez anos de monitoramento na Bacia do Ribeirão da Onça, apresentando SPI igual a -1,21 e -1,51, e sendo considerados moderadamente e severamente seco (Tabela 9), respectivamente. Em contrapartida, 2011 foi o ano mais úmido de todo o período de estudo, sendo referido como um ano muito úmido ($SPI = 1,56$).

Como comentado na seção 5.2.2, algumas estações meteorológicas estão espalhadas pela bacia, estando essas presentes na fazenda Monte Alegre, a cerca de 1,2 km do poço 19, e na fazenda Santa Maria da Fábrica, a aproximadamente 1,6 km. Comparando os valores de precipitação mensal, para os anos de 2013 e 2014, coletados no CRHEA com os dados dessas estações meteorológicas pode-se perceber que existe uma boa correlação entre ambas (Figura 26). Uma boa correlação também é observada quando comparados os dados de precipitação mensal, de 1983 a 1996, coletados no CRHEA com os coletados nas estações do Ribeirão do Feijão, Usina do Lobo e fazenda Campo Alegre, todas pertencentes a ANA (Figura 27). O

período de 1983 a 1996 foi escolhido em função da ausência de falhas para ambas as estações. Os dados de precipitação mensal utilizados nessa seção estão presentes no apêndice B.

Figura 26 - Correlação entre a precipitação mensal de 2013 e 2014 das estações Monte Alegre, Sta Maria da Fábrica em relação ao CRHEA.

Figura 27 - Correlação entre a precipitação mensal de 1983 a 1996 das estações Ribeirão do Feijão, Usina do Lobo e Faz. Campo Alegre em relação ao CRHEA.

Considerando também os totais anuais de precipitação para os anos hidrológicos (setembro - agosto) de 1983 a 1996⁵, observa-se que o coeficiente de variação (CV) entre os dados varia entre 4,23 e 25,46% (Tabela 11). Sabendo que quanto menor o CV mais homogêneo é o conjunto de dados, e como o CV, para praticamente todos os anos, foi menor que 25%, pode-se inferir que há razoável homogeneidade dos dados de precipitação anual na BRO.

Tabela 11 - Coeficiente de variação e Precipitação anual para os anos hidrológicos de 1983 a 1996.

Ano	Precipitação Anual (mm)				Coeficiente de Variação (%)
	Ribeirão do Feijão	Usina do Lobo	Faz. Campo Alegre	CRHEA	
1983	2380,40	2360,60	2166,20	2282,10	4,23
1984	1655,20	1572,50	1773,80	1605,20	5,34
1985	1392,00	1333,70	1432,50	1679,60	10,43
1986	1286,00	1190,50	1415,10	1457,00	9,11
1987	1424,80	1329,91	1394,30	1296,70	4,30
1988	1623,30	1509,40	1510,10	1251,38	10,69
1989	1519,10	1228,30	1588,60	1175,40	14,97
1990	1587,00	1443,20	1441,60	1437,40	4,95
1991	1667,30	1636,54	1511,70	1562,10	4,43
1992	1530,30	1525,50	1239,60	1377,00	9,78
1993	1591,90	1314,70	1363,30	1446,30	8,50
1994	1330,10	1090,50	1195,90	1200,50	8,14
1995	1814,40	955,90	1706,50	1651,80	25,46
1996	1546,40	1087,10	1633,10	1571,50	17,19

Tanto os resultados apresentados nas Figuras 26 e 27, como os da Tabela 11, indicam que não há problema em usar a série de precipitações do CRHEA, em termos de total anual ou mensal, para aplicações na Bacia do Ribeirão da Onça.

6.2 Variação dos níveis

A Figura 28 apresenta a variação do nível freático, como diferença da média histórica do período de estudo (equação 44), dos poços 16 (*site 1*) e 05 (*site 2*). É importante observar que na aplicação dessa metodologia para os poços 16 e 05 não houve necessidade de que os dados fossem normalizados pela precipitação, visto que a precipitação mensal ou anual não varia significativamente entre as áreas onde estão localizados os poços 16 e 05.

A variação do nível para os anos hidrológicos de 2005 a 2011 apresentam um compor-

⁵ De modo a facilitar a construção dos mapas e tabelas, optou-se por utilizar uma forma simplificada para se referir aos anos hidrológicos. 2005 refere-se ao ano hidrológico 2004-2005, 2006 ao ano hidrológico 2005-2006, e assim sucessivamente. Em todos os resultados, sempre se fará referência a anos hidrológicos (Setembro - Agosto).

tamento sazonal, em ambos os poços, como reflexo da disponibilidade de precipitação. Essa variação passa a se tornar menos negativa a partir de novembro, com gradativo aumento até atingir a máxima diferença positiva, em relação a média histórica, em março, com 92 cm de diferença (P16). Para o poço 05 essa diferença é cerca de 85 cm.

É importante observar que as curvas, nesse período, apresentavam um comportamento muito semelhante, praticamente coincidindo em alguns meses, abril a junho, o que demonstra que as hipótese adotadas, apresentadas na seção 5.5.1 para justificar a comparação entre os dados dos poços, parecem ser adequadas. A variabilidade mensal média do nível d'água ao longo desse período de 7 anos, quando o uso do solo era pastagem na área dos poços 16 e 05, não diferiu significativamente (teste - t , $p = 0,47 > 0,05$).

Figura 28 - Variação mensal do nível d'água para os poços 16 e 05, como diferença da média histórica.

De 2012 a 2014, a variação do nível freático, como diferença da média histórica, passou a apresentar significativa mudança em relação ao período com pastagem. Embora ainda seja possível perceber o comportamento sazonal, onde a variação do nível se torna cada vez mais negativa no período de estiagem e positiva no período de cheia, observa-se que em função da diminuição acentuada de precipitação anual de 2012 (1578,4 mm) a 2014 (1137,1 mm), houve redução da diferença do nível freático médio, em relação à média histórica, nos poços 05 e 16, resultando assim em uma diferença positiva máxima, em março, de apenas 14 cm (P05). Como no poço 05 também existe redução do nível freático, pode-se inferir que a redução do nível no poço 16 não se deve apenas a mudança de uso do solo, mas também a redução da precipitação.

Analisando os dados do poço 16, verifica-se que o comportamento semelhante entre

os poços, outrora observado durante o período cujo uso do solo era pastagem, foi modificado, sendo a variação dos níveis negativo em todos os meses, indicando que parcela pequena da frente de umidade está chegando ao aquífero e produzindo elevação de nível freático. A variação mensal média dos níveis, entre os poços 05 e 16, de 2012 a 2014, diferiu significativamente (teste - t , $p = 0,0002 < 0,05$).

Figura 29 - Variação mensal e anual média do nível d'água para os poços 19, 18, 17 e 16 (*site 1*), como diferença da média histórica.

A Figura 29 apresenta a variação média mensal e anual dos níveis, como diferença da média histórica, normalizado pela precipitação correspondente (equação 45), para os poços da fazenda Monte Alegre (*site 1*), sendo a barra de erro a amplitude da variação dos níveis na área. Durante os 7 anos iniciais, quando o solo estava coberto por pastagem, percebe-se que, em termos anuais, o ano hidrológico de 2006 foi o único que apresentou valor negativo (-0,54 m/m), reflexo da baixa precipitação anual (1208,7 mm). Esse ano foi o segundo mais seco de todos os 10 anos de monitoramento. Os anos de 2008 e 2011, em contrapartida, apresentaram as maiores diferenças positiva (0,74 e 0,72 m/m, respectivamente) em relação a média histórica, decorrente das elevadas taxas de precipitação desses anos hidrológicos.

Após 2011, mesmo as precipitações de 2012 e 2013 estando muito próximas da média de longo período (1494 mm), percebe-se uma diminuição cada vez maior do nível freático, resultando em maiores diferenças negativas, entre o nível médio anual e a média histórica, cada vez maior, chegando em 2014 a -2,12 vezes a precipitação anual. Utilizando a variação média mensal dos níveis, dos períodos com pasto e eucalipto (Figura 29) verificou-se que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto (teste - *Wilcoxon*, $p = 0,002 < 0,05$).

Um ponto interessante é que, se fosse comparado a variação dos níveis mensais médio do período de pastagem (2005-2011) com a variação dos níveis de cada ano do período de eucalipto, a diferença seria estatisticamente significativa apenas a partir do segundo ano com eucalipto (2013), não sendo portanto significativa no primeiro ano (2012). Todos os dados utilizados nessa seção estão presentes no apêndice C.

6.3 Espessura saturada e Gradiente hidráulico

A Figura 30 apresenta a espessura saturada para os poços 19, 18, 17 e 16, localizados na fazenda Monte Alegre. A espessura saturada desses poços foram obtidos em relação a cota da base do aquífero, sendo essa a interface entre o sedimento do cenozóico e do mesozóico. Como observado na figura, a espessura saturada diminui do poço 19 ao 16, sendo função da posição dos poços, ilustrado esquematicamente na Figura 25. É importante observar que a cota da base para cada poço, possivelmente, é diferente, e considerar a cota da base como um valor médio e, portanto, único para cada poço, constitui-se em uma aproximação.

Pelos gráficos da Figura 30, percebe-se a existência de comportamentos distintos, antes e depois de 2011. De 2005 a 2011 (ano hidrológico), na área de estudo, a espessura saturada diária do poço 19 variou entre 23 m, no período de cheia, para cerca de 16 m no fim da estação seca. Para o poço 16, nos períodos de cheia e estiagem, a espessura passou de 10 m para próximo de 7 m, respectivamente. De 2012 a 2014, houve expressiva redução da espessura saturada. Para o poço 19, a espessura variou entre 20 e 15 m, no período de cheia e de estiagem, respectivamente. Já para o poço 16, a espessura flutuou entre 8 e 6 m.

Figura 30 - Espessura saturada nos poços de monitoramento da fazenda Monte Alegre.

Na variação da espessura saturada, após 2011, percebe-se o efeito da precipitação, que pelos dados da Tabela 10, de 2012 a 2014, tem-se observado redução acentuada, chegando em

2014 a cerca de 1137 mm. Verifica-se também o efeito da mudança de uso do solo, visto que a espessura máxima diminuiu mais de 2 m (Poço 19), apesar da precipitação nos anos de 2012 e 2013 apresentarem valores muito próximos da precipitação anual de longo período (1494 mm).

O gradiente hidráulico horizontal foi estimado com o intuito de aplicar a método de Darcy. O gradiente hidráulico horizontal foi calculado pela razão entre a diferença de nível dos poços e a distância entre os mesmos. Na Figura 31, observa-se que o gradiente hidráulico entre os poços 19-18 é distinto dos poços 18-17 ou 17-16. O gradiente entre os poços 19-18 é menor que os outros, e apresenta uma flutuação muito diferente ao longo dos anos. De maneira geral, dos poços 18 a 16, o gradiente, acompanhando a redução do nível freático, apresenta diminuição após 2011.

Entre os poços 19 e 18, entretanto, o gradiente hidráulico aumenta após 2011. Esse comportamento deveras diferente do gradiente hidráulico entre os poços 19 e 18, quando comparado aos demais, sugere que a linha de fluxo que passa pelos poços 18, 17 e 16, não é a mesma que passa pelo poço 19. O gradiente horizontal apresentou, durante todo o período de monitoramento, valor máximo igual a 0,052 m/m e mínimo de 0,008 m/m. Dados médios mensais da espessura saturada e gradiente hidráulico podem ser visualizados no apêndice D.

Figura 31 - Gradiente hidráulico horizontal entre os poços de monitoramento.

6.4 Condutividade hidráulica

Como verificado no item 5.4, a condutividade hidráulica fora estimada utilizando os métodos de correlação segundo as equações propostas por [Terzaghi \(1925\)](#), [Bethke \(1985\)](#), [Mbonimpa et al. \(2002\)](#) e [Chapuis \(2004\)](#). Os resultados estão presentes na Tabela 12.

Na Tabela 12 é possível perceber que os pontos de coleta PCA2, PCA3 (*site 1*) e PCA5 (*site 2*) possuem valores de condutividade muito próximos, apresentando uma diferença máxima

de 40%⁶ para os pontos de coleta PCA5 e PCA3, utilizando o método de Terzaghi.

Tabela 12 - Condutividade hidráulica saturada estimada para diferentes profundidades.

Pontos de coleta	H (m)	n (%)	d10 (mm)	Condutividade hidráulica (m.s-1)			
				Bethke	Terzaghi	Mbonimpa et all.	Chapuis
PCA2	4,0	33,2	0,07	4,53E-06	2,02E-05	1,47E-05	5,42E-05
PCA5	4,9	33,0	0,07	4,48E-06	1,98E-05	1,19E-05	5,32E-05
PCA3	7,6	32,7	0,06	4,42E-06	1,4E-05	9,92E-06	4,06E-05
PCA1	14,8	41,6	0,05	6,66E-06	2,26E-05	4,02E-05	6,71E-05
PCA4	17,2	35,6	0,07	5,05E-06	2,59E-05	2,95E-05	6,76E-05

A partir desses dados pode-se concluir que K_s para um fluxo horizontal varia entre 10^{-6} e 10^{-5} m.s⁻¹. Essa condutividade é equivalente à permeabilidade de 10^{-13} m² e 10^{-12} m², respectivamente, sendo considerada uma permeabilidade alta (DEMING, 2002).

6.5 Recarga direta

A Figura 32 mostra a variação anual da recarga estimada pelos métodos iWTF e Darcy, assim como a precipitação anual. Embora haja diferenças e limitações em cada método, percebe-se que os valores de recarga direta estimados pelos métodos são muito próximos.

Antes da mudança de uso do solo, o maior valor de recarga, com valor médio de 877 mm (iWTF), é calculado para o ano hidrológico de 2007, correspondendo a 51% da precipitação anual (1707,9 mm). O menor valor de recarga direta (255 mm, iWTF) para o período de pastagem foi observado em 2006, quando foi registrado a menor precipitação do período (1208,7 mm), sendo equivalente a 21% da precipitação anual. Para o método de Darcy, o maior valor de recarga direta foi estimada em 803 mm, equivalente a 47% da precipitação do ano hidrológico de 2007. O menor valor de recarga foi 204 mm, correspondendo a 17% da precipitação de 2006.

Com a mudança de uso do solo, verifica-se uma redução acentuada na recarga, a qual vem diminuindo em função da redução da precipitação anual, principalmente em 2014, e da mudança de uso do solo. Após 2011, quando a recarga atingiu o segundo maior valor (774 mm, iWTF) do período de pastagem (42% da precipitação), verifica-se que a recarga passou, pelos dados do iWTF, em 2012, para 210 mm (13%), 147 mm em 2013 (10%) e apenas 2,3 mm em 2014 (0,002%). Em relação aos resultados do método de Darcy, que em 2011 apresenta valor de recarga direta de 778 mm (42% da precipitação), em 2012 o valor de recarga caiu para 242 mm (15%), em 2013 para 185 mm (12%) e em 2014 para somente 14,8 mm (0,01%).

A Figura 33 apresenta os valores de Recarga direta acumulada para ambos os métodos. Observa-se que em decorrência da redução da recarga após a mudança de cultura, verifica-se uma inflexão a partir de 2011. A recarga acumulada para os anos seguintes se torna cada vez

⁶ $[(1,98 \times 10^{-5} - 1,40 \times 10^{-5}) / (1,40 \times 10^{-5})] \times 100$

Figura 32 - Recarga direta anual estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.

Figura 33 - Recarga direta anual acumulada estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.

menor, o que se reflete na mudança de inclinação da curva, após 2011, a qual tem diminuído cada vez mais em relação ao eixo horizontal. Isso é reflexo tanto da redução da precipitação, de 2012 a 2014, quanto da mudança de uso do solo.

Considerando a recarga direta mensal média (Figura 34), observa-se que os resultados de ambos os métodos apresentam uma variação ao longo dos meses do ano muito semelhante, com os valores de recarga concentrados, principalmente, nos meses de outubro a março, quando a precipitação mensal média é superior a 140 mm. Pelos dados do iWTF, no período de pastagem, o maior valor de recarga mensal média ocorre no mês de janeiro com aproximadamente 221 mm, equivalente a 69% da precipitação. Para o método de Darcy, esse valor de recarga foi estimado em cerca de 246 mm, correspondendo a 77% da precipitação do mês.

Após a mudança de uso do solo, embora a flutuação do período de eucalipto seja semelhante ao período de pastagem, percebe-se uma redução acentuada da recarga mensal média. No mês de janeiro, a recarga diminuiu para quase 55 mm (iWTF), correspondendo a cerca de

Figura 34 - Recarga direta mensal estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.

17% da precipitação. Pelos dados do método de Darcy, para o mesmo mês, a recarga reduziu para quase 68 mm, equivalente a cerca de 21% da precipitação mensal média.

Utilizando os dados de recarga direta mensal média normalizados pela precipitação, para o método iWTF, verificou-se que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto (teste - *Wilcoxon*, $p = 0,01 < 0,05$). Para os resultados do método de Darcy é significativa a diferença para os períodos de pastagem e eucalipto (teste - *Wilcoxon*, $p = 0,049 < 0,05$), embora muito próximo de 0,05. Todos os dados utilizados nessa seção estão presentes no apêndice E.

6.6 Variação de armazenamento

A Figura 35 mostra a variação de armazenamento anual para os períodos com pastagem (2005 - 2011) e eucalipto (2012 - 2014). A precipitação anual para os 10 anos de monitoramento também é mostrada. Para o método iWTF foram utilizados a variação de armazenamento médio obtidos para os poços 19, 18, e 17, visto que foram esses os poços utilizados para a aplicação do iWTF, segundo metodologia apresentada na seção 5.5.2. Para o método de Darcy foram utilizados a variação de armazenamento estimada entre os poços 18 e 17, conforme método apresentado na seção 5.5.3.

Pelos gráficos, percebe-se que os valores estimados pelos métodos iWTF e Darcy são muito semelhantes. No período de pastagem, verifica-se grande variação do armazenamento ao longo dos anos. Antes da mudança de cultura, a maior redução de armazenamento ocorreu em 2006 com o valor de -168,26 mm (Darcy), correspondendo a 14% da precipitação anual. Para o método iWTF, esse valor correspondeu a -174,27 mm (14,4%).

Embora em 2011 tenha ocorrido a maior precipitação do período de estudo (1862 mm), 2007 apresentou o maior armazenamento, 300,56 mm (iWTF), equivalente a 17,6% da precipitação de 2007. Para o método de Darcy, em 2007, o armazenamento foi estimado em 300,08 mm (17,6%). Isso pode ser explicado pela distribuição da precipitação, que no ano hidrológico

de 2007 pode ter se concentrado, na área de estudo, mais que no ano 2011, resultando assim em maior armazenamento na zona saturada. Além disso, o armazenamento negativo também ocorreu nos anos de 2008 e 2009, resultantes da precipitação relativamente baixa, 1356 e 1397 mm, respectivamente. Isso também pode ter exercido influência no menor armazenamento evidenciado para o ano hidrológico de 2011.

Figura 35 - Variação de armazenamento anual estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

Após 2011, com a mudança de uso do solo, o armazenamento foi negativo em todos os anos subsequentes independentemente da precipitação anual estar próxima da média de longo período (1494 mm), como é o caso em 2012 (1578,4 mm) e 2013 (1517,3 mm). A Figura 36 apresenta a variação de armazenamento acumulada ao longo do tempo. De 2005 a 2011, o armazenamento acumulado apresentou valor negativo apenas no ano hidrológico de 2006, sendo estimado em -76,52 e -58,19 mm para os métodos iWTF e Darcy, respectivamente. Isso indica a depleção do aquífero.

O período de pastagem, embora tenha passado por anos de escassez hídrica, apresentou armazenamento acumulado positivo em praticamente todos os anos. Em contrapartida, após 2011, o armazenamento acumulado tem permanecido negativo independentemente da precipitação, atingindo em 2014 (no 3º ano com cultura de eucalipto) o déficit de armazenamento acumulado de aproximadamente -321 mm (Darcy). Para o método iWTF esse valor foi estimado em cerca de -341 mm.

A Figura 37 apresenta o armazenamento mensal médio de 2005 a 2011 (pastagem) e 2012 a 2014 (eucalipto). Observa-se que o armazenamento é negativo durante a maior parte do ano e apesar da estação úmida começar em setembro, o armazenamento se torna positivo somente a partir de novembro quando a precipitação mensal média excede os 140 mm. Isso também pode ser resultado do atraso (*delay*) até que a água percolada atinja o nível do aquífero.

Embora o padrão de variação de armazenamento entre os dois períodos seja semelhante percebe-se uma redução acentuada do pico, o qual passou (em termos da fração da precipitação mensal média) pelos dados do iWTF, de 58% (185,14 mm) no período de pastagem para pouco mais de 13% (43,97 mm) da precipitação mensal média no período com eucalipto. Pelos dados

Figura 36 - Variação de armazenamento anual acumulado estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

Figura 37 - Variação de armazenamento mensal médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

do método de Darcy, esse valor passou de 64% (203,25 mm) para aproximadamente 17% (54,93 mm) da precipitação mensal média do mês de janeiro (319 mm).

É interessante observar que durante o período de estiagem, de abril a agosto, o armazenamento para o período de eucalipto é maior (menos negativo) que no período de pastagem. Utilizando os dados de variação de armazenamento mensal médio de ambos os métodos, normalizados pela precipitação, verificou-se que não há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto (teste - t , $p > 0,05$). Todos os dados utilizados nessa seção estão presentes no apêndice E.

6.7 Fluxo lateral

O fluxo lateral diário calculado como $-AK$ (equação 29) é apresentado na Figura 38, o qual mostra uma flutuação semelhante a da espessura saturada mostrada na Figura 30. Pode-se perceber que o fluxo lateral estimado pelo iWTF é maior que o do método de Darcy, em praticamente todo período de estudo. Pela Figura 38, observa-se que existem dois padrões de comportamento bastante distintos entre os períodos hidrológicos 2005 - 2011 e 2012 - 2014.

Antes de 2011, quando a área de estudo tinha como uso do solo a pastagem, o fluxo lateral diário variava, pelos resultados do iWTF, entre 0,2 mm no fim da estação seca e um máximo de 3,0 mm para os maiores níveis durante o período de cheia. Após o plantio de eucalipto, o fluxo lateral diário caiu ano após ano, chegando em 2013 a um máximo de 0,47 mm, quando a precipitação anual foi de 1517 mm. Para os resultados do método de Darcy, o fluxo lateral diário variava, antes da mudança de uso do solo, entre 0,2 mm, no período de estiagem, até 2,9 mm na estação úmida. Após 2011, o fluxo lateral diário passou a variar entre 0,1 e 1,0 mm, nos períodos de estiagem e cheia, respectivamente.

Figura 38 - Fluxo lateral diário estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

A Figura 39 apresenta o fluxo lateral anual médio obtido por ambos os métodos. Novamente, percebe-se uma diferença razoável entre os valores obtidos pelos métodos, o que está associado com a robustez da equação utilizada pelo métodos para estimar o fluxo lateral. Como o iWTF utiliza a equação geral de fluxo, espera-se que os seus resultados estejam mais próximos do valor real.

Figura 39 - Fluxo lateral anual médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

Durante o período com pastagem, de 2005 a 2011, pelos dados do método iWTF, o

fluxo lateral variou entre 400 e 600 mm por ano. O ano de 2006 foi o que apresentou o menor fluxo lateral com cerca de 403 mm, o que é reflexo da baixa precipitação desse ano hidrológico (1208,7 mm). 2007, em função da elevada taxa de precipitação (1707,9 mm), apresentou fluxo lateral de quase 570 mm. O método de Darcy, assim como o iWTF, apresentou para o ano de 2006 o menor valor de fluxo lateral (247 mm) e para 2007 o maior (427 mm). Entre 2012 e 2014, o fluxo lateral diminuiu significativamente, passando, pelos dados do iWTF, em 2012 para 183 mm (12% da precipitação anual), em 2013 para 107 mm (7%) e atingindo em 2014 cerca de 67 mm (6%) da precipitação anual. Pelos dados do método de Darcy, o fluxo lateral passou em 2012 para cerca de 223 mm, chegando em 2014 a cerca de 166 mm (14%).

Figura 40 - Fluxo lateral anual acumulado estimada pelos métodos de Darcy e iWTF.

A Figura 40 apresenta os valores de Fluxo lateral acumulado para ambos os métodos. Assim como para os valores de recarga, observa-se que em decorrência da redução do fluxo lateral após a mudança de cultura, verifica-se uma inflexão a partir de 2011. O fluxo lateral acumulado para os anos seguintes se torna cada vez menor, o que se reflete na mudança de inclinação da curva, após 2011, a qual tem diminuído cada vez mais em relação ao eixo horizontal. Isso é reflexo tanto da redução da precipitação quanto da mudança de uso do solo.

Em termos do fluxo lateral mensal médio (Figura 41), observa-se uma grande diferença entre os fluxos nos períodos de pastagem e eucalipto. Pelo método de Darcy a variação é menor. O máximo fluxo mensal médio, no período com pastagem, ocorreu no mês de fevereiro (48 mm). No período de eucalipto, também para o mês de fevereiro, o fluxo lateral médio foi aproximadamente 23 mm. Como fração da precipitação mensal média, esses equivalem a aproximadamente 26% e 13%. Para os resultados do método iWTF, para o mês de fevereiro o fluxo lateral nos dois períodos foi aproximadamente 52 mm (28%) e 13 mm (6%).

Utilizando os dados de fluxo lateral mensal médio, para ambos os métodos, normalizados pela precipitação, verificou-se que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto (teste - t , $p < 0,05$). Todos os dados utilizados nessa seção estão presentes no apêndice E.

Figura 41 - Fluxo lateral mensal médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

6.8 Recarga profunda

A Figura 42 mostra a recarga profunda anual para o período de estudo, sendo essa o valor médio obtido a partir dos valores dos poços 19, 18 e 17, segundo metodologia presente na seção 5.5.2. A precipitação anual também é apresentada. Os valores estimados para a recarga profunda pelo método iWTF segue comportamento diferente, principalmente a partir da mudança de uso do solo.

Figura 42 - Recarga profunda anual estimada pelo método iWTF.

Durante o período com pastagem, a recarga profunda foi encontrada menor que 100 mm em seis (2005-2010) dos sete anos com pasto. Antes de 2011, a percolação profunda não era tão grande, sendo o maior valor dado em 2005, com aproximadamente 57 mm, e o menor em 2007 com 9 mm. Em 2011, percebe-se uma elevação acentuada da recarga profunda, possivelmente devido à alta precipitação desse ano hidrológico (1862,1 mm), embora seja um valor maior que o esperado. O mesmo pode ser dito para os anos de 2012 a 2014, que apresentaram valores de fluxo vertical muito acima dos valores do período de pastagem, variando de 257 mm, em 2012, a aproximadamente 100 mm em 2014.

Em termos da recarga profunda mensal média (Figura 43), verifica-se um comporta-

mento semelhante ao observado para os dados anuais. Durante o período de pastagem os valores de percolação profunda variaram de 0,32 mm a pouco mais de 8 mm. Já no período com eucalipto percebe-se um aumento significativo da recarga profunda, o qual variou de 3,2 mm a quase 24 mm. Assim, os valores de fluxo vertical do período com eucalipto estão muito acima dos valores para o período com pasto, o que, aparentemente, não faz sentido.

Figura 43 - Recarga profunda mensal estimada pelos método iWTF.

Em função dos resultados inesperados associados com a estimativa da recarga profunda, no período com eucalipto, pode-se inferir que existe um problema com o método iWTF quando utilizado para estimar recarga profunda. Isso será analisado mais cuidadosamente na discussão dos resultados. Todos os dados utilizados nessa seção estão presentes no apêndice E.

7 DISCUSSÃO

7.1 Comparação entre os métodos

Os métodos de Darcy e iWTF, como apresentados neste trabalho, apresentam muitas semelhanças e também pequenas diferenças. Embora estejam sendo tratados como um único método esses são na verdade uma composição de métodos. O método de Darcy utiliza a equação de Darcy para o cálculo do fluxo lateral, a flutuação do nível médio de água, entre poços, para a estimativa da variação de armazenamento e o balanço hídrico para o cálculo da recarga direta. No método iWTF o fluxo lateral médio é estimado com a equação de Boussinesq, para três piezômetros, a variação de armazenamento é obtida com a flutuação do nível d'água em cada poço, o fluxo vertical ou recarga profunda é calculada pela adição da variação de armazenamento e fluxo lateral e por fim o balanço hídrico é aplicado para a estimativa da recarga direta.

Em decorrência dos aspectos de cada método percebe-se que é difícil avaliar qual apresenta melhores estimativas. Na prática, a incerteza de cada método está vinculada à acurácia das estimativas de cada componente do balanço hídrico. De maneira geral, o iWTF apresentou estimativas maiores de recarga, fluxo lateral e variação de armazenamento que o método de Darcy. Além disso o iWTF estima a percolação profunda, o que não foi possível obter com o método de Darcy.

Isso pode ser justificado, em parte, pela incerteza sobre os valores de condutividade utilizados pelo método de Darcy. É fato que ambos os métodos fazem uso da condutividade hidráulica saturada na estimativa do fluxo lateral. Entretanto, diferente do iWTF que utiliza um valor médio de K_s , o método de Darcy necessita de valores de condutividade em cada poço de monitoramento para a aplicação da equação de Darcy. Isso eleva a incerteza das estimativas visto que, além da intrínseca variabilidade espacial de K_s , é difícil a obtenção de valores de condutividade em vários locais, principalmente em função dos custos envolvidos. Além disso, os métodos de correlação utilizados na estimativa da condutividade foram desenvolvidos para condições locais e sua aplicação em outras áreas de estudo constitui-se em uma aproximação. Ademais, o iWTF faz uso da equação de Boussinesq a qual é um modelo matemático mais robusto que a equação de Darcy.

O método de Darcy também apresenta dois aspectos que exercem influência na estimativa da recarga direta e que, portanto, merecem ser discutidos. O primeiro refere-se ao fato de não ter sido estimado a percolação profunda (como feito no iWTF) entre os poços utilizados na aplicação do método. Isso poderia ser feito estimando o fluxo vertical entre os poços através da equação de Darcy. Entretanto, para estimar o fluxo vertical é necessário valor de condutividade hidráulica vertical e de gradiente vertical. Segundo [Fetter \(2001\)](#), para estimar o gradiente vertical é necessário a utilização de dois poços muito próximos (1 a 2 m de distância). Como a

distância entre os poços 18 e 17 é de aproximadamente 100 m, a estimativa da recarga profunda entre esses não pode ser realizada.

O segundo aspecto se refere a diferença observada na Figura 38 do fluxo lateral para os métodos iWTF e Darcy. Verifica-se que a curva de recessão (os valores diários após o pico) do fluxo lateral pelo método de Darcy é muito ingríme quando comparado com a curva dos resultados do método iWTF. Isso se deve, em parte, aos valores de K_s utilizados para os poços 18 e 17. Além disso, o fluxo lateral médio está sendo estimado entre os poços 18 e 17 no caso do método de Darcy, utilizando a equação de Darcy, enquanto para o método iWTF está sendo estimado do poço 19 ao 17. Se o trecho entre os poços 19 e 18 também estivesse sendo utilizado na aplicação do método de Darcy, a curva de recessão não seria muito ingríme. Isso pode ser confirmado pela Figura 44, em que o fluxo lateral médio foi estimado entre os poços 19 e 17 para os métodos de Darcy e iWTF.

Figura 44 - Fluxo lateral diário médio estimado pelos métodos de Darcy e iWTF.

É importante salientar que o trecho entre os poços 19 e 18 não foi utilizado para a aplicação do método de Darcy porque, como observado na seção 6.3, o gradiente hidráulico horizontal entre os poços 19 e 18 é deveras diferente do gradiente calculado entre os poços 18 e 17 ou 17 e 16, o que indica que a linha de corrente que passa pelo poço 19, não é a mesma que passa pelo poço 18, 17 e 16.

O iWTF também apresenta problemas, principalmente na estimativa da recarga profunda. O método, como desenvolvido por [Wendland e Barnes \(2015\)](#), não é capaz de estimar o fluxo vertical quando está ocorrendo recarga. Isso ocorre porque a estimativa da recarga profunda é realizada, em cada poço, pela aplicação do balanço hídrico, $R = \Delta S + FL + R_p$, para os períodos onde a recarga direta (R) é zero, coincidindo, de modo geral, ao período de estiagem (abril a agosto). Isso sugere que as estimativas anuais da recarga profunda, pelo iWTF, são subestimadas.

Outra razão para o iWTF apresentar maiores valores resulta da estimativa da variação de

armazenamento. O sucesso do método depende de quão confiável são os valores de rendimento específico, um parâmetro que pode ser transiente e variável espacialmente, e da qualidade do monitoramento da flutuação do nível freático. Diferente do iWTF, em que as estimativas foram realizadas em cada piezômetro, onde é possível manter o monitoramento com razoável acurácia, no método de Darcy utilizou-se a flutuação diária do nível médio, calculado a partir da média aritmética dos níveis dos poços 18 e 17, sendo evidentemente uma aproximação.

Figura 45 - Correlação entre a recarga anual e mensal obtidas para o método iWTF e Darcy.

Apesar das diferenças, é possível verificar uma boa concordância entre os métodos para as estimativas anuais e mensais da recarga direta (Figura 45). Comparando as estimativas anuais da recarga, de ambos os métodos, com resultados de trabalhos anteriores, como de [Lucas e Wendland \(2015\)](#), os quais realizaram estimativas de recarga direta com o método WTF (tradicional) de 2004 a 2011, observa-se também uma boa correlação (Figura 46).

Figura 46 - Correlação da recarga anual do método iWTF e Darcy com os obtidos pelo WTF.

7.2 Análise dos resultados

O período de monitoramento (estudo) para o projeto de pesquisa é caracterizado por anos com altas taxas de precipitação, como 2007 e 2011, ou com baixas taxas, como 2006 e 2014, além de uma tendência de diminuição da precipitação de 2012 a 2014. Isto teve impacto sobre a recarga independentemente do uso do solo. Os resultados também mostram que a mudança de uso, de pastagem para eucalipto em 2012, exerceu significativo impacto sobre a hidrologia local, em adição ao efeito da precipitação, sendo observado em todas as variáveis em estudo.

De maneira geral, como apresentado na seção 3.1, as plantações e florestas usam mais água, produzem menos *runoff*, recarga subterrânea e deflúvio que vegetações com sistema radicular raso, como pastagem (ANDREASSIAN, 2004; VAN DIJK; KEENAN, 2007). Isso pode ser observado nos resultados apresentados.

A espessura saturada nos poços de monitoramento do *site* 1 diminuíram muito a partir de 2012, após a mudança de uso do solo, e isso ocorreu mesmo em anos hidrológicos com precipitação próxima a média de longo período (1494 mm), como 2012 e 2013. Quando comparado com o ano de 2005, que também choveu próximo da média de longo período, a espessura saturada (poço 19) diminuiu mais de 2 m no mês de abril. Para o poço 18 essa diferença chegou a quase 3 m. Em 2013, a diferença da espessura saturada (poço 18) em relação a abril de 2005 cresceu ainda mais, chegando a cerca de 4,2 m. Esse resultado é compatível com o observado por Adelana et al. (2015), os quais verificaram redução do nível freático acima de 4 m comparando uma plantação de *Eucalyptus globulus* de 5 anos de idade com pastagem.

Como consequência da diminuição do nível freático, a variação do nível como diferença da média histórica tem se tornado cada vez mais negativa no *site* 1 (Figura 29). Esse comportamento, antes da mudança de uso do solo, foi verificado apenas no ano de 2006 (-0,54 m/m), sendo consequência direta da baixa precipitação (1208,7 mm) desse ano hidrológico. Na comparação entre os poços 16 e 05, em termos da média mensal, o impacto da mudança de cultura ficou mais evidente visto que nessa comparação as áreas de monitoramento onde estão localizados os poços 16 e 05 compartilham de totais mensais de precipitação semelhantes. Neste caso, estatisticamente, a diferença não foi significativa de 2005 a 2011 quando o uso do solo em ambas as áreas era pastagem. De 2012 a 2014, quando a pastagem foi substituída por eucalipto na área do poço 16, verificou-se que a variação mensal média dos níveis dos poços foi significativamente diferentes.

Zhou et al. (2002), utilizando a mesma metodologia, mas comparando floresta mista com plantação de eucalipto, observaram que a variação dos níveis como diferença da média de longo período não era significativa. Esse resultado é compreensível já que quando se compara florestas com plantação de eucalipto o consumo de água não é muito diferente (LIMA, 1993; ALMEIDA; SOARES, 2003).

O declínio do nível de água após a mudança de cultura resultou em queda no gradiente hidráulico horizontal. Entre os poços 18 e 17, em junho do ano hidrológico de 2005, o gradi-

ente chegou a 0,043 m/m. Em 2012, também para o mês de junho, o gradiente horizontal foi estimado em 0,031 m/m, o que representa uma redução de quase 28%⁷ em relação ao gradiente de 2005. Para junho do ano hidrológico 2013, o gradiente horizontal foi estimado em 0,028 m/m, indicando que a diferença cresceu para quase 35% em relação a junho de 2005.

Esse comportamento se deve à diminuição da recarga direta ocorrida a partir da mudança de uso do solo, em que para o ano hidrológico de 2012 foi estimado em cerca de 210 mm (iWTF), equivalente a 13% da precipitação anual de 2012 (1578,4). Para o ano hidrológico de 2013 a recarga caiu mais ainda, chegando a quase 148 mm. Isso equivale a 10% da precipitação desse ano hidrológico (1517,3 mm). Se comparado com 2005, em que foi estimado aproximadamente 610 mm (42% da precipitação anual), observa-se significativa diminuição da recarga, o qual tende a aumentar a medida que o eucalipto passa do primeiro para o segundo ano do ciclo mesmo a precipitação estando próxima da média de longo período (1498 mm).

É interessante observar que mesmo 2006 apresentando a menor precipitação anual (1208,7 mm) do período de pastagem, a recarga direta foi estimada maior (254,89 mm, 21%) do que para os anos de 2013 e 2014. Comportamento semelhante é também observado para os resultados de recarga do método de Darcy. Utilizando os dados de recarga direta mensal média, pelos dados do iWTF (normalizados pela precipitação), verificou-se que a diferença entre os períodos de pastagem e eucalipto foi significativa (teste - *Wilcoxon*, $p = 0,01 < 0,05$). Um aspecto interessante é que a partir dos dados do método de Darcy, a diferença entre os períodos foi significativa (teste - *Wilcoxon*, $p = 0,049 < 0,05$), entretanto praticamente igual a 0,05. Isso está relacionado com a concepção dos métodos iWTF e Darcy. Esse resultado indica que embora o valor p seja muito próximo de 5% o impacto da mudança de cultura existe.

Essa redução da recarga está claramente associada à maior taxa de evapotranspiração do eucalipto, se comparado a pastagem. De modo geral, a evapotranspiração tende a aumentar à medida que o eucalipto cresce, mas também pode variar com a disponibilidade hídrica e com o índice de área foliar (ALMEIDA et al., 2007).

A consequência direta da diminuição da recarga e, portanto, da espessura saturada ou gradiente hidráulico, foi a redução do armazenamento e fluxo lateral. Assim como no caso das outras variáveis, o fluxo lateral, pelos resultados do iWTF, apresentou redução significativa quando comparado os períodos com pastagem e eucalipto. O ano de 2006 apresentou o menor fluxo lateral com cerca de 403 mm (iWTF), o que está ligado à baixa precipitação desse ano hidrológico (1208,7 mm). Esse fluxo é equivalente 33% da precipitação anual de 2006. Após a mudança de cultura o fluxo lateral passou em 2012 para 12% (182,70 mm), em 2013 para 7% (107,40 mm) e atingindo em 2014 cerca de 6% (66,30 mm) da precipitação anual, com o eucalipto estando no 3º ano da rotação. Como verificado na seção Resultados, utilizando os dados de fluxo lateral mensal médio, normalizados pela precipitação, verificou-se que a

⁷ $[(0,043 - 0,031)/(0,043)] \times 100$

diferença entre os período de pastagem e eucalipto foram significativas.

É o fluxo lateral, como fluxo de base, que alimenta a vazão dos rios no período de estiagem e, portanto, a redução significativa do fluxo lateral pode comprometer a contribuição da área de estudo no período de seca. Esse resultado é compatível com o observado por [Scott e Lesch \(1997\)](#), os quais comparando 3 bacias pareadas (bacia A, B e C com *Eucalyptus grandis*, *Pinus patula* e pastagem, respectivamente), observaram que a redução no deflúvio e no fluxo mínimo do rio, a partir do terceiro ano do florestamento com eucalipto, foi significativa.

Embora a mudança de cultura esteja reduzindo o fluxo lateral, isso não significa, necessariamente, que esse efeito será percebido a nível de bacia hidrográfica, na seção de monitoramento de vazão. Isso se deve ao fato da área impactada ser pequena, e, portanto, a contribuição do fluxo lateral de outras áreas da bacia hidrográfica provoca o amortecimento desse efeito.

Com a redução na recarga direta, o armazenamento do aquífero também ficou comprometido. Como evidenciado no item 6.4, o armazenamento, após a mudança de uso do solo, tem permanecido negativo mesmo em anos hidrológicos em que a precipitação está próxima da média de longo período, como é o caso de 2012 ou 2013. Verificou-se que o déficit de armazenamento acumulado atingiu em 2014 o valor de quase -341 mm (iWTF). Para o método de Darcy esse valor foi estimado em quase -321 mm.

Um aspecto que chama a atenção nos resultados é a variação de armazenamento mensal (Figura 37). Nos meses do período de cheia percebe-se que para o período com eucalipto houve redução da água disponível para o armazenamento, o que possivelmente está associado com a maior evapotranspiração dos eucaliptos. Nos meses de estiagem, entretanto, a situação se inverte e o armazenamento médio mensal do período com eucalipto torna-se menos negativo que no período com pastagem.

Figura 47 - Nível de água dos poços 25 e 19 para o período 2012 a 2014.

Uma possível explicação para esse comportamento está associado com a redução da espessura saturada após a mudança de uso do solo, como observado na seção 6.3. Como o

nível freático a partir de 2012 está mais baixo, o gradiente hidráulico também reduziu. Com a diminuição do gradiente o fluxo lateral também reduziu e por consequência a depleção do armazenamento também diminuiu. Isso implica, portanto, em menor impacto no armazenamento.

Outra explicação, e, possivelmente, o principal motivo do armazenamento menos negativo está associada com a influência da plantação sobre o entorno da área de estudo. Além dos poços 19, 18, 17 e 16, esta presente na fazenda Monte Alegre o poço 25, em área com pastagem adjacente à plantação de eucalipto. O poço 25 está localizado a 112 m do poço 19 e vem sendo monitorado desde dezembro de 2011. A Figura 47 apresenta a flutuação do nível de água nos poços 25 e 19. Durante todo o período de monitoramento o nível do poço 25 sempre esteve acima do nível do poço 19.

Figura 48 - Fluxo transversal da área de pastagem para a área de eucalipto na fazenda Monte Alegre.

Isso indica que, desde 2012, após a mudança de uso do solo, vem ocorrendo fluxo transversal da área de pastagem para a área com eucalipto (Figura 48). Esse fluxo tem contribuído para o aumento do armazenamento na zona saturada, tornando-o menos negativo, justificando o comportamento do período de estiagem observado através do armazenamento mensal médio (Figura 37). Possivelmente, não apenas o armazenamento dos meses de estiagem está sendo afetado pelo fluxo transversal mas também nos meses de setembro a março. Devido a esse fenômeno é que, estatisticamente, a diferença entre o armazenamento mensal médio dos períodos com eucalipto e pastagem não foram significativos.

A presença desse fluxo transversal também foi verificado por [Engel et al. \(2005\)](#), os

quais, comparando *Eucalyptus camaldulensis* e pastagem na Argentina, observaram que o gradiente hidráulico entre as áreas das culturas induziu o fluxo subterrâneo da área de pastagem para a plantação resultando na elevação do nível d'água.

A percolação ou recarga profunda, como os outros parâmetros, também foi afetada pela mudança de uso do solo. Através dos resultados presentes na seção 6.7, percebe-se um comportamento significativamente diferente, especialmente de 2012 a 2014, quando a recarga profunda anual foi estimada em 257 e 104 mm. Estes valores elevados de fluxo vertical devem-se à própria concepção do método iWTF, o qual estima a recarga profunda pelo balanço hídrico (Figura 24) durante o período de estiagem.

Neste caso, o balanço hídrico do iWTF só funciona se durante o período de aplicação não existir mudanças na área de estudo que comprometam a variação de armazenamento diário do período de cheia e de estiagem. Com a mudança de cultura observada na fazenda monte alegre, houve redução da recarga direta anual. Essa diminuição levou a existência de mais eventos de armazenamento negativo (ΔS) se comparado ao período de 2005 a 2011, o que na prática é como se o período de estiagem fosse prolongado. Como o fluxo lateral também diminuiu devido a redução do gradiente horizontal, ao realizar o balanço hídrico ($R_p = -\Delta S - FL$) em cada poço, como o ΔS está muito maior se comparado ao período com pastagem, o valor de recarga profunda aumenta muito. Essa é a justificativa para o elevado valor de percolação profunda após a mudança de uso do solo.

Os problemas na estimativa do fluxo vertical para o iWTF, evidenciam que essa é uma das principais limitações do método. Apesar disso, como a correlação entre os dados de recarga (Figura 45 e 46) estimados pelos métodos de Darcy e iWTF foram satisfatórias, isso indica que embora haja limitações as estimativas foram razoáveis.

8 CONCLUSÕES

Este estudo examinou o impacto da mudança de uso do solo de pastagem para eucalipto, utilizando uma abordagem hidrogeológica, em sites da bacia do ribeirão da onça. As comparações foram realizadas entre os *sites* 1 e 2, através da análise da variação dos níveis, e apenas no *site* 1 estimando a recarga direta, fluxo lateral, variação de armazenamento e recarga profunda, através dos métodos de Darcy e iWTF.

Embora a correlação entre os métodos tenha sido satisfatória, ao compará-los, pode-se verificar que ambos possuem limitações. No caso do método de Darcy, a estimativa do fluxo lateral é onde está presente a maior parte da incerteza, devido à intrínseca variabilidade da condutividade hidráulica e também pela necessidade de se estimar um valor de condutividade para cada piezômetro utilizado. O iWTF se mostrou um método mais robusto. Além de necessitar de um valor médio de condutividade, na estimativa do fluxo lateral é utilizado a equação geral de fluxo para aquífero livre, o que implica em estimativas mais confiáveis do fluxo lateral. O ponto negativo do iWTF está associado com a estimativa da recarga profunda, a qual só pode ser estimado durante o período de estiagem, e seus resultados podem ficar comprometidos em função da existência de mais eventos de armazenamento negativo.

Os resultados indicam que a recarga direta reduziu, mesmo quando a precipitação anual esteve próxima da média de longo período. Comparando com 2006, que teve a menor precipitação do período de pastagem, com a recarga equivalendo a 21% (254,89 mm) da precipitação anual, pode-se perceber a significativa redução da recarga, onde em 2013 correspondeu a apenas 10% (147,52 mm) da precipitação anual. Em termos da média mensal, o mês de janeiro é o que apresentou maior valor de recarga, proporcionalmente a precipitação média mensal. Antes da mudança de uso do solo, a recarga mensal média de janeiro era cerca de 69% (221 mm) da precipitação. Após mudança de uso, esse valor caiu para 17% (55 mm), pelos dados do iWTF.

Como consequência da diminuição da recarga, a espessura saturada e gradiente hidráulico reduziram. Comparando os anos com precipitação próximo da média histórica, 2005, 2012 e 2013, observa-se que para o poço 18 a espessura saturada diminuiu cerca de 3 m, comparando o mês de abril para os anos hidrológicos de 2012 e 2005. Comparando com 2013, a redução da espessura saturada aumentou para 4,2 m (abril). Considerando o gradiente hidráulico horizontal, a redução chegou a 35%, comparando o gradiente médio do mês junho para os anos de 2013 e 2005.

A redução na recarga, incorreu no aumento da variação do nível em relação a média histórica no *site* 1, o qual tem se tornado cada vez maior, negativamente, de 2012 a 2014. Na comparação entre os poços 16 e 05, a diferença estatística, quando as áreas de interesse estavam cobertas por pasto (2005-2011), não foi significativa. Quando a área do poço 16 sofreu mudança de uso, para eucalipto (2012-2014), a diferença passou a ser significativa.

Comparando o fluxo lateral, verificou-se que os métodos de Darcy e iWTF apresentaram

resultados significativamente diferentes, o que está associado com a concepção dos métodos. Comparando com 2016 que apresentou o menor fluxo lateral anual (iWTF), 33% (403 mm), o fluxo lateral em 2012 caiu para 12% (183 mm), em 2013 para 7% (107 mm) e chegando em 2014 em cerca de 6% (66 mm) da precipitação anual.

Em termos da variação de armazenamento, esse tem-se tornado cada vez menor. Considerando os valores acumulados ao longo dos anos observou-se que no período com pastagem, 2006 foi o que apresentou o único armazenamento acumulado negativo (-76 mm, iWTF). Após mudança de uso, esse valor tem se tornado cada vez maior (negativo), chegando em 2014 com um déficit de aproximadamente -341 mm (iWTF). Pelos dados do método de Darcy, esse valor foi estimado em quase -321 mm. Considerando a média mensal, verificou-se que durante o período de estiagem o armazenamento do período com eucalipto torna-se menos negativo que no período com pastagem. A explicação para esse comportamento, durante o período de estiagem, está associado com o fluxo transversal observado da área de pastagem para a área com eucalipto na fazenda Monte Alegre. Esse fluxo, aparentemente, é o responsável pelo aumento do armazenamento na zona saturada tornando-o menos negativo durante o período com eucalipto.

A recarga profunda, como estimado pelo iWTF, apresentou problemas principalmente de 2012 a 2014 quando o fluxo vertical variou de 243 a 100 mm, respectivamente. O problema está no fato dos valores do período, pós mudança de uso do solo, serem muito acima dos valores estimados para o período com pastagem no *site* 1. Como observado na seção 7.2, a diminuição da recarga incorreu em aumento do número de eventos de armazenamento negativo e a diminuição do fluxo lateral. Assim, a aplicação do balanço hídrico ($R_p = -\Delta S - FL$) levou ao aumento, não esperado, da percolação profunda.

Embora os métodos possuam limitações, verificou-se uma correlação satisfatória entre os dados de recarga estimados pelo método de Darcy e iWTF.

Na análise estatística, em termos da média mensal, além da variação do nível freático, observou-se que a diferença da recarga direta e fluxo lateral, para o período de pastagem e eucalipto, foram estatisticamente significativa. O armazenamento não apresentou diferença significativa em decorrência da influência do fluxo transversal, o qual aumentou sensivelmente o armazenamento mensal médio de abril a agosto.

A partir dos resultados, portanto, pode-se concluir que a plantação de eucalipto afetou significativamente o comportamento sazonal e anual do balanço hídrico na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, p. 142, 2013.
- ADELANA, S. M. et al. A comparison of streamflow, salt and water balances in adjacent farmland and forest catchments in south-western victoria, australia. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 6, p. 1630–1643, 2015.
- 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. v. 27, p. 159–170, 2003.
- ALMEIDA, A. C. et al. Growth and water balance of eucalyptus grandis hybrid plantations in brazil during a rotation for pulp production. v. 251, p. 10–21, 2007.
- ANDREASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. v. 291, p. 1–27, 2004.
- ANON. Eucalyptus: curse or cure? the impacts of australia's 'world tree' in other countries. *ACIAR Bulletin: Australian Centre for International Agricultural Research*, 1992.
- ARAÚJO, L. M.; FRANCA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the mercosul aquifer system in the parana and chaco-parana basins, south america, and comparison with the navajo-nugget aquifer system, USA. v. 7, p. 317–336, 1999.
- BEAR, J. *Hydraulics of groundwater*. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2012. 569 p. ISSN 0486136167.
- BELL, R. W. et al. Groundwater response to reforestation in the darling range of western australia. v. 119, p. 179–200, 1990.
- BETHKE, C. A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. B8, p. 6817–6828, 1985.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. v. 55, p. 3–23, 1982.
- BOUVET, J. Les plantations d'eucalyptus: évolutions récentes et perspectives. L'association Silva, Paris, France, 1999.
- BREDEHOEFT, J. The conceptualization model problem - surprise. v. 13, p. 37–46, 2005.
- BROWN, A. E. et al. Predicting the impact of plantation forestry on water users at local and regional scales - an example for the murrumbidgee river basin, australia. v. 251, p. 82–93, 2007.
- BROWN, A. E. et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. v. 310, p. 28–61, 2005.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? v. 104, p. 185–228, 2004.

CABRAL, O. M. R. et al. The energy and water balance of a eucalyptus plantation in southeast brazil. v. 388, p. 208–216, 2010.

CALDATO, S. L.; SCHUMACHER, M. V. The water use by forest plantations - a review. v. 23, p. 509–518, 2013.

CALDER, I. R. Water use of eucalypts - a review with special reference to south india. v. 11, p. 333–342, 1986.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. (Ed.). *SSSA Book Series*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1986. p. 901–926. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssabookseries/methodsofsoilan1/901>>.

CASTRO JÚNIOR, P. R. *Mapeamento Morfopedológico Aplicado à Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça (SP) e À Bacia-Escola do Rio Cachoeirinha (MT) em Áreas de Recarga do Aquífero Guarani*. Relatório (Pós-Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CHAPUIS, R. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 41, n. 5, p. 787–795, 2004.

CHAPUIS, R.; AUBERTIN, M. On the use of the kozeny-carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 40, n. 3, p. 616–628, 2003.

CHAPUIS, R. P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT*, v. 71, n. 3, p. 401–434, AUG 2012. ISSN 1435-9529.

CHAPUIS, R. P.; LÉGARÉ, P. P. Simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. In: *ASTM Special Technical Publication*. San Diego, CA, USA: Symposium on Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, 1992. p. 177–186.

CROSBIE, R. S. et al. Monitoring the hydrological impact of land use change in a small agricultural catchment affected by dryland salinity in central NSW, australia. v. 88, p. 43–53, 2007.

DAEE. *Estudo de Águas subterrâneas: região administrativa n° 6, Ribeirão Preto*. Departamento de águas e energia elétrica do Estado de São Paulo, 1974.

DE VRIES, J. J.; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. v. 10, p. 5–17, 2002.

DELIN, G. N. et al. Comparison of local to regional scale estimates of ground-water recharge in minnesota, USA. v. 334, p. 231–249, 2007.

DELLEUR, J. W. *The Handbook of Groundwater Engineering, Second Edition*. [S.l.]: CRC Press, 2006. 1320 p.

DEMING, D. *Introduction to hydrogeology*. [S.l.]: McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, 2002. 468 p. ISSN 0072326220.

DINGMAN, S. L. *Physical hydrology*. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice-Hall, 2002. 646 p. ISSN 0130996955.

DYE, P. J. Estimating water use by eucalyptus grandis with the penman-monteith equation. p. 329–337, 1987.

ENGEL, V. et al. Hydrological consequences of eucalyptus afforestation in the argentine pampas. *Water Resources Research*, v. 41, n. 10, 2005.

FAO. State of the world's forests. 2003.

FARLEY, K. A.; JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. v. 11, p. 1565–1576, 2005.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology - 4th ed.* [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, 2001.

FISHER, L. H.; HEALY, R. W. Water movement within the unsaturated zone in four agricultural areas of the united states. v. 37, p. 1051–1063, 2008.

FOSTER, S. et al. The guarani aquifer initiative - towards realistic groundwater management in a transboundary context. GWMAE and TheWorld Bank, Washington,, 2009.

GOMES, L. H. *Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-28042009-132417/>>.

GOMEZ, A. A.; RODRIGUEZ, L. B.; VIVES, L. S. The guarani aquifer system: estimation of recharge along the uruguay-brazil border. v. 18, p. 1667–1684, 2010.

GUANABARA, R. C. *Modelo transiente de fluxo em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-20092011-101231/>>.

HAYES, M. J. et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 80, n. 3, p. 429–438, 1999.

HAZEN, A. Some physical properties of sand and gravel, with special reference to their use in filtration. *Massachusetts State Board of Health, 24th annual report*, p. 539–556, 1892.

HEALY, R. W. *Estimating groundwater recharge*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. 245 p. ISSN 0521863961.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. v. 10, p. 91–109, 2002.

HIRATA, R. et al. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the guarani aquifer system in são paulo state, brazil. v. 31, p. 444–456, 2011.

- HIRATA, R. et al. Guarani aquifer system exploitation in araraquara. v. 12, p. 115–127, 2012.
- HOEYNG, D. et al. High-resolution aquifer analog of fluvial-aeolian sediments of the guarani aquifer system. v. 71, p. 3081–3094, 2014.
- HUBBARD, R. M. et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing eucalyptus plantations. v. 259, p. 1714–1721, 2010.
- HUNT, E. D. et al. Monitoring the effects of rapid onset of drought on non-irrigated maize with agronomic data and climate-based drought indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 191, p. 1–11, 2014.
- JACKSON, R. B. et al. Trading water for carbon with biological sequestration. v. 310, p. 1944–1947, 2005.
- JOHNSON, A.; PRILL, R.; MORRIS, D. Specific yield: Column drainage and centrifuge moisture content. 1963.
- KALLARACKAL, J.; SOMEN, C. K. An ecophysiological evaluation of the suitability of eucalyptus grandis for planting in the tropics. v. 95, p. 53–61, 1997.
- LERNER, D. N. Identifying and quantifying urban recharge: a review. v. 10, p. 143–152, 2002.
- LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. *Groundwater recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge, International Contributions to Hydrogeology*. [S.l.]: Hanover: Verlag Heinz Heise, 1990. v. 8. 345 p. ISSN 392270591X.
- LIBARDI, P. L. *Dinâmica de água no Solo*. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 352 p.
- LIMA, W. P. *Impacto Ambiental do Eucalipto*. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 1993. 301 p.
- LIMA, W. P. et al. Comparative evapotranspiration of eucalyptus, pine and natural cerrado vegetation measured by the soil water balance method. v. 1, p. 5–11, 1990.
- LUCAS, M.; WENDLAND, E. Recharge estimates for various land uses in the guarani aquifer system outcrop area. *Hydrological Sciences Journal*, 2015.
- MBONIMPA, M. et al. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering*, v. 20, n. 3, p. 235–259, 2002.
- MCJANNET, D. L.; VERTESSY, R. A.; CLIFTON, C. A. Observations of evapotranspiration in a break of slope plantation susceptible to periodic drought stress. v. 20, p. 169–177, 2000.
- MOENCH, A. F. Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data. v. 32, p. 949–957, 1994.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. 5. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- NAVFAC-DM7. *Design Manual - Soil mechanics, foundations, and earth structures*. Washington, DC: US Govt Printing Office, 1974.

- NEUMAN, S. P.; WITHERSPOON, P. A. Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. v. 8, p. 1284–1298, 1972.
- OLIVA, A.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R. Determinação da condutividade hidráulica da formação rio claro: Análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug. v. 19, 2005.
- ONYEKWELU, J. C.; STIMM, B.; EVANS, J. Review plantation forestry. In: GUNTER, S. et al. (Ed.). *Tropical Forestry*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 399–454.
- PEEL, M. C. et al. Identification and explanation of continental differences in the variability of annual runoff. v. 250, p. 224–240, 2001.
- RABELO, J. L.; WENDLAND, E. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the guarani aquifer system, brazil. v. 17, p. 1733–1748, 2009.
- REBOUÇAS, A. C.; ARMORE, L. O sistema aquífero guarani - SAG. v. 16, p. 135–143, 2002.
- RIBEIRO, W. C. Aquífero guarani: gestão compartilhada e soberania. v. 22, p. 227–238, 2008.
- RITZEMA, H. P. *Drainage principles and applications*. The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement - ILRI, 1994. 1125 p. ISSN 9070754339.
- ROSOMAN, G. *The Plantation Effect*. New Zealand, 1994.
- SALEMI, L. F. et al. Land-use change in the atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. v. 499, p. 100–109, 2013.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. v. 10, p. 18–39, 2002.
- SCHICHT, R. J.; WALTON, W. C. Hydrologic budgets for three small watersheds in illinois. v. 40, 1961.
- SCOTT, D. F.; LESCH, W. Streamflow responses to afforestation with eucalyptus grandis and pinus patula and to felling in the mokobulaan experimental catchments, south africa. v. 199, p. 360–377, 1997.
- SHAHABI, A. A.; DAS, B. M.; TARQUIN, A. J. Empirical relation for coefficient of permeability of sand. In: *Geomechanics-interaction: Fourth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*. Australia: Institution of Engineers, 1984. v. 84, n. 2, p. 54–57.
- SILVA, F. P. et al. Geologic framework and hydrofacies of guarani aquifer system in the city of ribeirão preto (SP). v. 38, p. 54–65, 2008.
- SIMMERS, I. *Estimation of natural groundwater recharge*. [S.l.]: Springer, 1988. v. 222. 513 p. ISSN 9027726329.
- SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing eucalyptus plantation in brazil. v. 253, p. 130–147, 2001.
- SOMARATNE, N.; SMETTEM, K.; FRIZENSCHAF, J. Three criteria reliability analyses for groundwater recharge estimations. v. 72, p. 2141–2151, 2014.

SOPHOCLEOUS, M. A. Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects. v. 124, p. 229–241, 1991.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the guarani aquifer system in the state of sao paulo, brazil. v. 10, p. 643–655, 2002.

STEDNICK, J. D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. v. 176, p. 79–95, 1996.

SUZANO PAPEL E CELULOSE. *Resumo Público do Plano de Manejo Florestal - SP*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.suzano.com.br/portal/suzano-papel-e-celulose/plano-de-manejo.htm>>.

SWANK, W. T.; DOUGLASS, J. E. Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. v. 185, p. 857–859, 1974.

TAYLOR, C. J.; GREENE, E. A. Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology. 2008.

TAYLOR, D. W. *Fundamentals of soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1948.

TERZAGHI, C. Principles of soil mechanics: Iii-determination of permeability of clay. *Engineering News Records*, v. 95, n. 21, p. 832–836, 1925.

TIWARI, K. M.; MATHUR, R. S. Water consumption and nutrient uptake by eucalypts. 1983.

VAN DIJK, A. I. J. M.; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. v. 251, p. 1–9, 2007.

VILLAÇA, H.; FERRI, M. G. Transpiração de eucalyptus tereticornis. v. 11, p. 1–29, 1954.

VILLELA, M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. [S.l.]: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

VITAL, A. R. T.; LIMA, W. P.; CAMARGO, F. R. A. Efeitos do corte raso de uma plantao de eucalyptus sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia no vale do paraíba, SP. v. 55, p. 5–16, 1999.

WENDLAND, E.; BARNES, R. J. iwtf - an improved recharge estimate method based on water table fluctuations. *submitted*, p. 24, 2015.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. v. 342, p. 261–269, 2007.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in eucalyptus: A review. v. 193, p. 113–140, 2004.

WILSON, K. B. et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. v. 106, p. 153–168, 2001.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. v. 37, p. 701–708, 2001.

ZHOU, G. Y. et al. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: A case study in southern china. *Forest Ecology and Management*, v. 167, p. 209–222, 2002.

APÊNDICE A – Análise estatística

A.1 Análise estatística entre os sites 1 e 2

A.1.1 Variação dos níveis

Inicialmente a análise foi aplicada entre os anos hidrológicos 2005 a 2011, período no qual os sites estavam cobertos por pastagem, e 2012 a 2014, em que os sites 1 e 2 estão cobertos por eucalipto e pastagem, respectivamente. Essa análise foi realizada entre os poços 16 e 05 utilizando a série mensal da variabilidade do nível freático em relação a média histórica. Portanto, utilizou-se um teste estatístico para 2 grupos sendo ambos amostras independentes. Assim, as hipóteses nula e alternativa adotadas foram:

$$H_0 : \mu_{p05} = \mu_{p16}$$

$$H_1 : \mu_{p05} \neq \mu_{p16}$$

A.1.1.1 2005 a 2011

Utilizou-se o software *Past* (*Paleontological Statistics 3.05*) afim de realizar a análise dos dados:

Variáveis	Poço 05	Poço 16
N	12	12
Min	-0,74	-0,45
Max	0,85	0,92
Média	0,06	0,23
Erro padrão	0,17	0,15
Variância	0,34	0,25
Desvio Padrão	0,58	0,50
Mediana	0,04	0,24

Através dos dados acima, verifica-se que a mediana dos dados dos poços 05 e 16 estão bem próximos da média, o que indica que os dados tendem fortemente a uma distribuição normal. Assim, para ter maior confiabilidade sobre a tendência dos dados optou-se por realizar o teste de normalidade Shapiro-Wilk e Anderson-Darling.

Através do teste de normalidade, tanto Shapiro-Wilk quanto Anderson-Darling, confirmando a análise descritiva dos dados, verifica-se que os dados de ambos os poços tendem a uma

Variáveis	Poço 05	Poço 16
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,92	0,92
p(normal)	0,32	0,29
Anderson-Darling A	0,30	0,33
p(normal)	0,52	0,46

distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, optou-se por realizar o teste t. Obteve-se valor de $p = 0,47 > 0,05$, permitindo concluir que não há diferença significativa no período de 2004 a 2011 entre os deltas dos níveis para os poços 05 e 16 ($\alpha = 0.05$), e portanto, não havendo motivo para rejeitar a hipótese nula.

A.1.1.2 2012 a 2014

Variáveis	Poço 05	Poço 16
N	12	12
Min	-0,49	-0,98
Max	0,14	-0,27
Média	-0,15	-0,53
Erro padrão	0,06	0,06
Variância	0,04	0,05
Desvio Padrão	0,21	0,22
Mediana	-0,15	-0,51

Assim como no período de 2004 a 2011, a mediana está muito próximo da média aritmética, o que indica que os dados tem a uma distribuição normal. Para confirmar realizou-se o teste de normalidade.

Variáveis	Poço 05	Poço 16
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,94	0,93
p(normal)	0,51	0,34
Anderson-Darling A	0,30	0,36
p(normal)	0,53	0,39

Através do teste de normalidade, tanto Shapiro-Wilk quanto Anderson-Darling, verifica-se que os dados dos poços 05 e 16 tendem a uma distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, aplicando o teste t, para duas amostras independentes, obteve-se o valor de $p = 0,0002 < 0,05$, o que permite concluir que há diferença significativa no período de 2012 a 2014 entre os deltas dos níveis dos poços 05 e 16 ($\alpha=0,05$), e portanto, havendo motivo para rejeitar a hipótese nula.

A.2 Análise estatística no sites 1

A.2.1 Variação dos níveis

A.2.1.1 Análise entre médias mensais de ambos os períodos

Para avaliar estatisticamente a variabilidade dos níveis no *site* 1, onde ocorreu a mudança de cultura, é importante observar que ao longo dos 10 anos tem-se dois tratamentos pareados, Pastagem (Pa) e Eucalipto (Eu), visto que a mudança é no tratamento e não na área ou na posição dos poços. Assim, as hipóteses nula e alternativa são:

$$H_0 : \mu_{Pa} = \mu_{Eu}$$

$$H_1 : \mu_{Pa} \neq \mu_{Eu}$$

Nesta etapa, como o *site* 1 possui área relativamente pequena, foram utilizados os dados médios mensais correspondentes ao período de pastagem (2004-2011) e eucalipto (2012-2014), normalizados pela precipitação média mensal. Com o auxílio do software *Past* afim de realizar a análise dos dados:

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Min	-4,64	-61,40
Max	22,93	-3,77
Média	7,92	-18,83
Erro padrão	3,05	5,46
Variância	111,75	357,74
Desvio Padrão	10,57	18,91
Mediana	8,58	-9,93

Pelos dados acima percebe-se que no período de eucalipto a mediana (-9,93) está muito afastada da média aritmética (-18,83), o que indica que os dados possuem uma forte assimetria. Outro aspecto importante é que o boxplot de ambos os períodos, praticamente, não apresentam valores que compartilham do mesmo intervalo.

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,89	0,79
p(normal)	0,11	0,01
Anderson-Darling A	0,49	1,06
p(normal)	0,18	0,01

Isso evidência, mesmo sem fazer análise de significância, que os dados, entre os períodos de pastagem e eucalipto, são significativamente diferentes. Os testes de normalidade demonstram que os dados, no período cujo uso do solo é eucalipto, não tendem a uma distribuição normal ($p < 0,05$). Assim, aplicando o teste de Wilcoxon, para amostras pareadas, obteve-se valor de $p = 0,002 < 0,05$, o que permite concluir, como previsto, que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto em relação ao delta dos níveis médios mensais dos poços ($\alpha=0,05$), e portanto, havendo motivo para rejeitar a hipótese nula, aceitando assim a hipótese alternativa.

A.2.1.2 Análise entre a média mensal do período de pastagem e a média mensal ano a ano para o período com eucalipto

Se os mesmos passos do item anterior for seguido, verificar-se-á que, com exceção de 2012 (primeiro ano de eucalipto), os dados não tendem a normalidade ($p < 0,05$). Assim, aplicando o teste t para amostras pareadas entre o período de pastagem e o primeiro ano de eucalipto obteve-se $p = 0,08 > 0,05$, não tendo sido significante a diferença de nível para o primeiro ano (2012) dos eucaliptos em relação a pastagem. Aplicando o teste de Wilcoxon, para o segundo ano, entretanto, $p = 0,0002 < 0,05$, passando a ser significativo a diferença entre os dois tratamentos. O mesmo para o terceiro ano de eucalipto ($p = 0,0002$).

A.2.2 Variação de armazenamento

A.2.2.1 Análise entre médias mensais de ambos os períodos

Assim como na análise da variabilidade do nível, tem-se dois tratamentos pareados. As hipóteses nula e alternativa são:

$$H_0 : \mu_{Pa} = \mu_{Eu}$$

$$H_1 : \mu_{Pa} \neq \mu_{Eu}$$

Utilizou-se o software *Past* afim de realizar uma análise descritiva e gráfica dos dados (método iWTF):

Através do boxplot observa-se que a mediana de ambos os tratamentos estão próximos da média dos dados, o que sugere que ambos os tratamentos tendem a normalidade. De modo a ter maior confiabilidade sobre a tendência dos dados optou-se por realizar o teste de normalidade:

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Min	-1,34	-0,84
Max	0,58	0,14
Média	-0,38	-0,27
Erro padrão	0,19	0,08
Variância	0,43	0,08
Desvio Padrão	0,65	0,29
Mediana	-0,32	-0,25

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,95	0,95
p(normal)	0,61	0,64
Anderson-Darling A	0,21	0,30
p(normal)	0,83	0,52

Através do teste de normalidade, tanto Shapiro-Wilk quanto Anderson-Darling, verifica-se que os dados dos poços para ambos os períodos tendem a uma distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, aplicando o teste t para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,46 > 0,05$, o que permite concluir que não há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto para a variação de armazenamento mensal médio dos poços ($\alpha = 0,05$), portanto, não havendo motivo para rejeitar a hipótese nula.

Se o mesmo procedimento for repetido para os resultados do método de Darcy, verificar-se-ia que os dados também tendem a uma distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, aplicando o teste teste t para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,38 > 0,05$.

A.2.3 Fluxo Lateral

A.2.3.1 Análise entre médias mensais de ambos os períodos

Assim como nos itens anteriores, tem-se dois tratamentos pareados. Assim, as hipóteses nula e alternativa são:

$$H_0 : \mu_{Pa} = \mu_{Eu}$$

$$H_1 : \mu_{Pa} \neq \mu_{Eu}$$

Sendo a descrição dos resultados de fluxo lateral (método iWTF) dada por:

Pelo boxplot percebe-se que no período de pastagem o fluxo lateral médio apresenta maior desvio padrão e portando os extremos estão mais distantes em relação a média. Além

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Min	0,11	0,03
Max	1,32	0,30
Média	0,58	0,13
Erro padrão	0,12	0,03
Variância	0,19	0,01
Desvio Padrão	0,43	0,09
Mediana	0,48	0,11

disso, a mediana, embora não coincida com a média, está muito próximo dessa, o que sugere que os dados dos tratamentos tendem a normalidade. Aplicando o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling:

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,90	0,93
p(normal)	0,15	0,38
Anderson-Darling A	0,47	0,36
p(normal)	0,20	0,40

Através do teste de normalidade verifica-se que os dados dos poços para ambos os períodos tendem a uma distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, aplicando o teste t para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,001 < 0,05$, o que permite concluir que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto para o fluxo lateral mensal médio dos poços ($\alpha = 0,05$), portanto, havendo motivo para rejeitar a hipótese nula.

Se o mesmo procedimento for repetido para os resultados do método de Darcy, verificar-se-ia que os dados também tendem a uma distribuição normal ($p > 0,05$). Assim, aplicando o teste teste t para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,0001 < 0,05$.

A.2.4 Recarga direta

A.2.4.1 Análise entre médias mensais de ambos os períodos

Como nos itens anteriores, tem-se dois tratamentos pareados. Assim, as hipóteses nula e alternativa são:

$$H_0 : \mu_{Pa} = \mu_{Eu}$$

$$H_1 : \mu_{Pa} \neq \mu_{Eu}$$

Sendo a descrição dos resultados de recarga direta (método iWTF) dada por:

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Min	0,02	0,00
Max	0,85	0,22
Média	0,28	0,06
Erro padrão	0,08	0,03
Variância	0,07	0,01
Desvio Padrão	0,26	0,09
Mediana	0,24	0,02

Pelo boxplot percebe-se que a mediana está muito próxima do primeiro quartil o que indica que existe uma razoável assimetria dos dados em torno da média, o que pode indicar que os dados não tendem a uma distribuição normal. Aplicando o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling:

Variáveis	Pasto	Eucalipto
N	12	12
Shapiro-Wilk W	0,85	0,71
p(normal)	0,0331	0,0010
Anderson-Darling A	0,75	1,60
p(normal)	0,0373	0,0002

Através do teste de normalidade verifica-se que os dados dos poços para ambos os períodos não tendem a uma distribuição normal ($p < 0,05$). Assim, aplicando o teste Wilcoxon para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,007 < 0,05$, o que permite concluir que há diferença significativa para os períodos de pastagem e eucalipto para a recarga direta mensal média dos poços ($\alpha = 0,05$), portanto, havendo motivo para rejeitar a hipótese nula.

Se o mesmo procedimento for repetido para os resultados do método de Darcy, verificar-se-ia que os dados também não tendem a uma distribuição normal ($p < 0,05$). Assim, aplicando o teste Wilcoxon para amostras pareadas obteve-se valor de $p = 0,049 < 0,05$.

APÊNDICE B – Precipitação mensal

B.1 Estações: Ribeirão do Feijão, Ferroviária, Usina do Lobo, Faz. Campo Alegre e CRHEA.

Ano	Mês	Precipitação (mm)				
		Est. Ribeirão do Feijão	Est. Ferroviária	Est. Usina do LOBO	Est. Fazenda C. Alegre	Est. CRHEA
1983	set	12,0	34,6	11,6	11,7	11,0
	out	312,2	311,2	309,6	275,4	279,4
	nov	192,2	108,6	175,7	141,5	197,6
	dez	199,0	260,0	231,0	270,8	229,5
	jan	592,2	496,0	596,5	495,3	539,6
	fev	203,1	313,2	223,8	229,8	241,6
	mar	293,3	197,6	289,3	245,1	277,2
	abr	164,2	186,6	149,7	144,4	135,6
	mai	263,2	322,8	235,3	236,3	247,0
	jun	116,3	84,8	97,7	93,4	83,8
	jul	32,6	32,6	40,0	20,7	38,8
	ago	0,1	0,0	0,4	1,8	1,0
1984	set	314,2	286,6	295,1	381,8	287,7
	out	141,2	156,8	148,0	172,5	139,6
	nov	201,6	158,5	184,9	163,0	154,8
	dez	343,1	342,5	300,9	397,8	309,6
	jan	173,2	121,0	171,4	193,0	154,1
	fev	128,2	185,0	148,0	126,9	148,2
	mar	64,7	50,4	79,2	44,1	143,7
	abr	106,6	85,5	73,8	85,8	45,1
	mai	38,4	39,2	23,7	41,6	76,4
	jun	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
	jul	0,4	1,8	1,0	0,5	0,5
	ago	143,6	143,3	146,0	166,8	145,5
1985	set	95,8	86,4	110,7	112,2	92,4
	out	36,4	36,2	44,2	19,6	45,9
	nov	140,9	148,1	142,7	144,2	151,5
	dez	219,2	160,7	243,1	193,8	276,1
	jan	293,8	224,7	309,4	250,2	152,8
	fev	184,6	158,6	166,8	172,1	263,1
	mar	186,5	137,6	136,3	183,4	263,4
	abr	168,8	166,4	112,2	280,8	142,4
	mai	39,1	37,4	35,6	45,2	132,2
	jun	20,5	17,0	24,4	20,4	0,0
	jul	1,7	2,9	2,6	2,8	32,0
	ago	4,7	10,6	5,7	7,8	127,8
1986	set	25,4	30,2	26,5	20,4	24,6
	out	15,8	21,7	17,0	41,8	46,8
	nov	188,5	148,0	143,4	145,0	163,4
	dez	171,2	158,0	172,7	163,0	427,1
	jan	109,3	132,3	129,9	127,0	104,0
	fev	260,5	171,4	268,1	257,0	215,0
	mar	208,1	276,7	194,2	385,6	198,9
	abr	49,5	97,7	40,7	36,6	32,9
	mai	112,8	87,0	58,8	105,4	111,3
	jun	0,7	0,0	0,7	0,8	0,0
	jul	36,1	24,2	27,7	26,7	32,0
	ago	108,1	106,6	110,8	105,8	101,0

Ano	Mês	Precipitação (mm)				
		Est. Ribeirão do Feijão	Est. Ferroviária	Est. Usina do LOBO	Est. Fazenda C. Alegre	Est. CRHEA
1987	set	28,8	33,0	26,9	16,5	22,8
	out	32,6	57,6	38,4	36,1	43,7
	nov	105,4	101,8	89,5	124,6	89,5
	dez	412,2	414,0	386,1	482,3	399,9
	jan	305,6	301,0	299,6	287,5	318,2
	fev	168,9	161,0	134,8	129,6	130,0
	mar	57,2	109,2	56,1	66,9	48,3
	abr	59,6	41,6	67,6	31,4	62,7
	mai	178,4	185,0	153,7	149,3	109,5
	jun	52,4	62,4	55,0	50,6	50,3
1988	jul	15,8	14,2	13,4	12,5	13,5
	ago	7,9	6,2	8,8	7,0	8,3
	set	91,8	90,2	91,6	80,7	86,7
	out	65,4	103,2	55,1	52,2	51,4
	nov	223,2	196,4	198,9	195,5	61,4
	dez	229,2	301,9	215,0	251,1	177,2
	jan	310,7	315,4	307,9	334,4	278,3
	fev	174,4	215,3	224,2	167,6	212,9
	mar	201,0	241,2	181,8	175,7	141,2
	abr	138,5	133,8	133,8	93,3	161,0
1989	mai	107,5	91,2	85,6	86,1	69,6
	jun	19,6	8,4	15,5	15,5	11,7
	jul	28,0	27,0	0,0	27,0	0,0
	ago	34,0	33,0	0,0	31,0	0,0
	set	91,0	88,0	5,8	85,0	24,7
	out	123,0	133,0	170,1	121,0	154,2
	nov	160,0	165,0	126,7	161,0	115,6
	dez	252,0	252,0	104,4	231,0	84,2
	jan	264,2	277,2	196,4	276,3	246,2
	fev	163,7	282,2	178,0	317,0	174,7
1990	mar	141,3	87,2	134,8	117,4	94,4
	abr	103,8	74,7	92,8	45,4	81,7
	mai	9,8	19,4	10,7	19,3	7,5
	jun	56,7	54,7	52,7	66,5	50,9
	jul	130,3	123,4	129,5	125,4	116,8
	ago	23,3	26,1	26,4	23,3	24,5
	set	114,7	121,1	62,4	111,1	87,9
	out	49,7	39,4	39,6	31,7	38,0
	nov	179,8	232,8	152,3	210,1	186,8
	dez	213,0	239,8	225,5	207,9	246,0
1991	jan	357,8	352,7	342,3	425,9	317,0
	fev	135,4	94,6	113,9	99,8	131,2
	mar	255,3	161,2	237,6	126,1	189,3
	abr	99,4	45,0	109,0	76,4	82,5
	mai	67,0	57,8	48,0	46,7	48,2
	jun	5,8	10,6	6,1	6,2	5,0
	jul	40,1	70,3	41,7	47,9	43,1
	ago	69,0	54,4	64,8	51,8	62,4
	set	61,4	41,6	51,7	61,9	56,6
	out	141,9	122,2	113,8	119,1	121,3
1991	nov	90,4	256,6	111,0	138,5	99,0
	dez	158,6	133,2	127,5	178,0	111,4
	jan	229,0	305,8	265,9	244,0	275,0
	fev	255,4	204,7	267,4	173,7	218,2
	mar	448,0	396,4	460,4	316,5	403,7
	abr	163,6	178,0	133,1	174,4	167,3
	mai	61,5	73,6	54,8	57,7	58,3
	jun	23,2	28,8	18,5	15,7	19,3
	jul	34,3	42,6	32,4	32,2	32,0
	ago	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Ano	Mês	Precipitação (mm)				
		Est. Ribeirão do Feijão	Est. Ferroviária	Est. Usina do LOBO	Est. Fazenda C. Alegre	Est. CRHEA
1992	set	45,7	41,9	39,6	21,8	78,7
	out	224,6	235,5	211,0	179,7	159,9
	nov	49,6	66,3	32,6	58,4	23,4
	dez	343,5	240,2	395,8	319,1	329,8
	jan	210,4	133,9	194,2	131,9	205,4
	fev	146,4	165,4	133,3	158,8	90,3
	mar	189,3	284,0	244,8	134,6	232,5
	abr	87,1	185,2	66,4	50,6	58,8
	mai	151,6	206,1	145,7	126,4	127,5
	jun	1,9	24,2	0,6	0,0	1,0
1993	jul	57,2	197,2	47,8	32,4	46,6
	ago	23,0	26,2	13,7	25,9	23,1
	set	145,9	141,0	116,9	119,4	125,8
	out	134,4	142,7	114,1	132,3	106,1
	nov	152,4	232,0	183,0	171,9	208,4
	dez	176,9	129,1	128,5	109,0	135,0
	jan	178,0	154,4	96,1	124,4	209,3
	fev	365,6	451,4	291,2	315,6	266,7
	mar	127,3	222,5	130,8	104,2	123,4
	abr	137,6	111,0	102,8	106,0	103,2
1994	mai	55,9	32,8	52,0	61,3	58,7
	jun	74,6	84,8	52,9	69,5	59,9
	jul	7,1	11,6	5,9	4,3	5,6
	ago	36,2	42,6	40,5	45,4	44,2
	set	142,3	155,5	125,7	107,2	121,1
	out	115,3	106,5	119,4	63,1	99,0
	nov	73,8	117,8	98,9	106,7	81,5
	dez	265,6	193,6	179,2	169,5	207,7
	jan	252,2	300,8	255,1	279,7	216,7
	fev	137,6	177,0	35,2	155,5	148,2
1995	mar	122,1	226,0	153,3	181,5	143,7
	abr	80,0	57,4	36,1	45,8	45,1
	mai	80,0	23,2	38,6	28,4	76,2
	jun	35,4	35,2	31,6	37,0	36,0
	jul	25,8	22,0	17,4	21,5	25,3
	ago	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	set	0,0	1,4	0,6	0,3	0,0
	out	118,2	116,9	117,9	77,8	129,5
	nov	220,7	232,0	92,9	156,3	214,7
	dez	202,7	230,0	69,5	261,5	160,8
1996	jan	350,6	311,0	91,1	340,3	327,5
	fev	536,3	580,9	331,2	526,6	491,5
	mar	121,1	87,6	100,1	90,5	107,4
	abr	140,1	164,6	53,8	137,0	96,9
	mai	77,5	56,1	55,4	68,1	64,0
	jun	19,7	14,8	20,0	18,8	24,5
	jul	27,5	41,4	23,4	29,3	35,0
	ago	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	set	42,6	39,6	33,1	53,8	38,7
	out	160,9	201,6	111,4	113,1	157,3
1996	nov	186,9	139,9	89,0	119,1	185,5
	dez	239,7	256,5	156,3	264,6	245,9
	jan	332,1	310,8	257,5	411,6	351,5
	fev	165,3	158,8	89,2	241,5	175,9
	mar	243,0	182,4	183,9	241,5	243,2
	abr	82,8	72,5	84,2	109,8	77,7
	mai	37,1	62,2	47,9	27,8	40,8
	jun	18,3	19,2	18,1	21,7	19,5
	jul	2,4	0,0	0,2	4,6	1,7
	ago	35,3	27,6	16,3	24,0	33,8

B.2 Estações: Faz. Monte Alegre, Faz. Sta. Maria da Fábrica e CRHEA.

Ano	Mês	Precipitação (mm)		
		Est. Monte Alegre	Est. Sta. Maria da Fábrica	Est. CRHEA
2013	set	78,6	82,4	95,3
	out	105,2	100,5	128,5
	nov	115,8	89,7	77,9
	dez	237,1	273,3	295,3
	jan	232,3	283,7	286,3
	fev	140,5	153,0	162,2
	mar	166,1	139,4	134,2
	abr	136,6	79,7	95,5
	mai	154,4	132,7	155,2
	jun	48,1	53,3	71,6
	jul	36,5	32,4	13,1
	ago	0,5	3,6	2,2
2014	set	46,6	54,9	70,2
	out	158,2	145,1	167,9
	nov	155,0	177,3	199,2
	dez	71,5	95,1	129,2
	jan	109,6	109,8	105,6
	fev	127,9	100,0	166,5
	mar	154,8	156,9	148,6
	abr	88,8	101,9	56,4
	mai	48,5	50,8	61,5
	jun	2,8	2,4	1,5
	jul	29,6	25,4	24,4
	ago	10,6	8,3	6,1

APÊNDICE C – Variação dos níveis

C.1 Poços 16 e 05.

Uso do solo	Mês	Var. Mensal	Var. Mensal
		P05	P16
Pastagem (2005-2011)	Set	-0,37	-0,25
	Out	-0,59	-0,38
	Nov	-0,74	-0,45
	Dez	-0,71	-0,30
	Jan	-0,02	0,45
	Fev	0,65	0,89
	Mar	0,85	0,92
	Abr	0,79	0,78
	Mai	0,57	0,55
	Jun	0,34	0,34
	Jul	0,09	0,14
	Ago	-0,12	0,01
Pastagem / Eucalipto (2012-2014)	Set	0,08	-0,30
	Out	-0,17	-0,35
	Nov	-0,38	-0,51
	Dez	-0,39	-0,51
	Jan	-0,13	-0,33
	Fev	0,11	-0,27
	Mar	0,14	-0,38
	Abr	0,03	-0,54
	Mai	-0,13	-0,67
	Jun	-0,17	-0,71
	Jul	-0,24	-0,81
	Ago	-0,49	-0,98

Ano	Pastagem	Eucalipto
	P5	P16
2005	0,61	0,36
2006	-0,36	-0,41
2007	-0,26	0,31
2008	0,07	0,38
2009	-0,44	-0,02
2010	0,11	0,22
2011	0,71	0,76
2012	0,58	0,16
2013	-0,02	-0,39
2014	-0,99	-1,36

C.2 Poços 19, 18, 17 e 16.

Uso do Solo	Meses	Var. Mensal	Var. Mensal	Var. Mensal	Var. Mensal	Var. Mensal	Amplitude
		P16	P17	P18	P19	Média	
Pastagem (2005-2011)	Set	-4,39	-4,24	-2,30	-4,05	-3,75	2,09
	Out	-2,91	-3,37	-3,42	-4,34	-3,51	1,43
	Nov	-3,11	-4,27	-5,05	-6,12	-4,64	3,01
	Dez	-1,25	-2,27	-3,41	-4,45	-2,85	3,20
	Jan	1,40	1,75	0,73	-1,33	0,64	3,08
	Fev	4,78	9,14	10,98	7,03	7,98	6,20
	Mar	6,02	11,54	15,84	12,67	11,52	9,82
	Abr	9,32	17,82	26,03	23,69	19,21	16,71
	Mai	9,69	20,24	31,80	29,99	22,93	22,11
	Jun	7,87	18,03	31,13	30,50	21,88	23,26
	Jul	4,13	11,99	24,58	25,27	16,49	21,14
	Ago	0,25	4,83	15,27	16,36	9,18	16,11
Eucalipto (2012-2014)	Set	-5,30	-14,21	-20,31	-6,83	-11,66	15,01
	Out	-2,69	-7,73	-11,33	-5,91	-6,92	8,63
	Nov	-3,57	-8,62	-12,49	-8,08	-8,19	8,92
	Dez	-2,08	-5,49	-8,30	-6,01	-5,47	6,22
	Jan	-1,04	-3,64	-5,94	-4,47	-3,77	4,90
	Fev	-1,44	-3,96	-6,98	-4,73	-4,28	5,54
	Mar	-2,47	-5,85	-9,22	-6,06	-5,90	6,75
	Abr	-6,42	-13,66	-20,38	-14,50	-13,74	13,96
	Mai	-11,65	-23,76	-34,61	-25,56	-23,90	22,95
	Jun	-16,35	-34,68	-50,56	-39,04	-35,16	34,21
	Jul	-23,07	-44,26	-64,19	-50,68	-45,55	41,11
	Ago	-34,19	-59,90	-83,95	-67,55	-61,40	49,76

Uso do Solo	Ano	P16	P17	P18	P19	Média	Amplitude
Pastagem	2005	0,25	0,40	0,55	0,52	0,43	0,30
	2006	-0,34	-0,47	-0,51	-0,84	-0,54	0,50
	2007	0,18	0,45	0,62	0,37	0,41	0,45
	2008	0,28	0,69	1,08	0,93	0,74	0,80
	2009	-0,01	0,12	0,23	-0,02	0,08	0,25
	2010	0,14	0,36	0,48	0,18	0,29	0,34
	2011	0,41	0,63	0,86	1,01	0,73	0,60
	2012	0,10	-0,14	-0,27	0,21	-0,02	0,49
Eucalipto	2013	-0,26	-0,75	-1,18	-0,84	-0,76	0,92
	2014	-1,19	-1,99	-2,79	-2,50	-2,12	1,59

APÊNDICE D – Espessura saturada e Gradiente hidráulico médio mensal

Data	Espessura Saturada (m)				Gradiente Horizontal (m/m)		
	P19	P18	P17	P16	P19-18	P18-17	P17-16
Sep-04	18,05	14,46	11,07	7,75	0,022	0,032	0,031
Oct-04	17,81	14,28	10,94	7,67	0,021	0,032	0,031
Nov-04	17,50	13,99	10,77	7,57	0,021	0,031	0,030
Dec-04	17,30	13,88	10,94	7,83	0,021	0,028	0,029
Jan-05	18,33	15,21	12,67	8,90	0,019	0,024	0,035
Feb-05	21,12	18,21	14,08	9,36	0,018	0,039	0,044
Mar-05	21,39	18,41	13,74	9,20	0,018	0,044	0,042
Apr-05	21,28	17,95	13,28	8,91	0,020	0,044	0,041
May-05	20,69	17,49	12,92	8,67	0,019	0,043	0,040
Jun-05	20,26	17,02	12,57	8,46	0,020	0,042	0,038
Jul-05	19,71	16,44	12,17	8,24	0,020	0,041	0,036
Aug-05	19,24	15,98	11,86	8,05	0,020	0,039	0,036
Sep-05	18,76	15,53	11,54	7,87	0,020	0,038	0,034
Oct-05	18,34	15,13	11,27	7,71	0,019	0,037	0,033
Nov-05	17,95	14,75	11,03	7,56	0,019	0,035	0,032
Dec-05	17,59	14,41	10,85	7,52	0,019	0,034	0,031
Jan-06	17,28	14,18	10,75	7,51	0,019	0,033	0,030
Feb-06	17,21	14,37	10,97	7,61	0,017	0,032	0,031
Mar-06	17,19	14,61	11,22	7,74	0,016	0,032	0,032
Apr-06	17,45	14,92	11,41	7,86	0,015	0,033	0,033
May-06	17,68	15,07	11,41	7,73	0,016	0,035	0,034
Jun-06	17,60	14,84	11,19	7,58	0,017	0,035	0,034
Jul-06	17,34	14,48	10,91	7,42	0,017	0,034	0,032
Aug-06	17,12	14,18	10,71	7,30	0,018	0,033	0,032
Sep-06	16,86	13,87	10,55	7,18	0,018	0,032	0,031
Oct-06	16,62	13,60	10,42	7,10	0,018	0,030	0,031
Nov-06	16,43	13,43	10,31	7,05	0,018	0,030	0,030
Dec-06	16,32	13,39	10,44	7,39	0,018	0,028	0,028
Jan-07	17,71	15,79	12,67	8,80	0,012	0,030	0,036
Feb-07	20,64	18,47	14,39	9,44	0,013	0,039	0,046
Mar-07	21,64	18,93	14,30	9,31	0,016	0,044	0,047
Apr-07	21,68	18,72	13,99	9,14	0,018	0,045	0,045
May-07	21,51	18,37	13,63	8,90	0,019	0,045	0,044
Jun-07	21,07	17,84	13,21	8,69	0,020	0,044	0,042
Jul-07	20,57	17,27	12,80	8,51	0,020	0,043	0,040
Aug-07	20,21	16,95	12,69	8,48	0,020	0,041	0,039

Data	Espessura Saturada (m)				Gradiente Horizontal (m/m)		
	P19	P18	P17	P16	P19-18	P18-17	P17-16
Sep-07	20,03	16,82	12,54	8,29	0,020	0,041	0,040
Oct-07	19,64	16,42	12,24	8,09	0,020	0,040	0,039
Nov-07	19,23	16,02	12,03	8,18	0,019	0,038	0,036
Dec-07	19,10	16,01	12,13	8,17	0,019	0,037	0,037
Jan-08	19,04	16,02	12,18	8,28	0,018	0,036	0,036
Feb-08	19,60	16,72	12,77	8,54	0,017	0,038	0,039
Mar-08	20,60	17,75	13,46	8,89	0,017	0,041	0,043
Apr-08	21,18	18,16	13,64	8,91	0,018	0,043	0,044
May-08	20,79	17,60	13,14	8,69	0,019	0,043	0,041
Jun-08	20,32	17,06	12,73	8,48	0,020	0,041	0,040
Jul-08	19,88	16,59	12,37	8,26	0,020	0,040	0,038
Aug-08	19,42	16,14	12,03	8,08	0,020	0,039	0,037
Sep-08	18,99	15,74	11,75	7,90	0,020	0,038	0,036
Oct-08	18,58	15,37	11,48	7,74	0,020	0,037	0,035
Nov-08	18,18	14,99	11,23	7,59	0,019	0,036	0,034
Dec-08	17,83	14,66	11,05	7,57	0,019	0,034	0,032
Jan-09	17,71	14,80	11,52	8,16	0,018	0,031	0,031
Feb-09	18,38	15,93	12,37	8,53	0,015	0,034	0,036
Mar-09	19,58	17,06	13,05	8,61	0,015	0,038	0,041
Apr-09	19,52	16,71	12,64	8,40	0,017	0,039	0,040
May-09	19,20	16,27	12,26	8,16	0,018	0,038	0,038
Jun-09	18,80	15,82	11,88	7,95	0,018	0,037	0,037
Jul-09	18,45	15,39	11,56	7,78	0,019	0,036	0,035
Aug-09	18,08	14,99	11,29	7,71	0,019	0,035	0,033
Sep-09	17,76	14,68	11,18	7,75	0,019	0,033	0,032
Oct-09	17,51	14,51	11,16	7,66	0,018	0,032	0,033
Nov-09	17,32	14,48	11,11	7,63	0,017	0,032	0,032
Dec-09	17,35	14,70	11,42	7,90	0,016	0,031	0,033
Jan-10	18,31	16,16	12,57	8,48	0,013	0,034	0,038
Feb-10	19,90	17,62	13,61	9,02	0,014	0,038	0,043
Mar-10	20,48	17,80	13,50	8,89	0,016	0,041	0,043
Apr-10	20,31	17,38	13,11	8,75	0,018	0,040	0,041
May-10	20,14	17,11	12,86	8,53	0,018	0,040	0,040
Jun-10	19,75	16,63	12,47	8,31	0,019	0,040	0,039
Jul-10	19,31	16,13	12,10	8,10	0,019	0,038	0,037
Aug-10	18,85	15,66	11,74	7,91	0,019	0,037	0,036
Sep-10	18,43	15,22	11,43	7,72	0,019	0,036	0,035
Oct-10	18,04	14,83	11,17	7,60	0,019	0,035	0,033
Nov-10	17,68	14,49	10,95	7,48	0,019	0,034	0,032
Dec-10	17,43	14,37	11,05	7,68	0,018	0,032	0,031
Jan-11	19,10	16,69	13,27	9,20	0,015	0,033	0,038
Feb-11	22,72	20,17	15,41	9,89	0,015	0,045	0,051
Mar-11	23,20	19,70	14,87	10,02	0,021	0,046	0,045
Apr-11	22,99	18,70	14,15	9,70	0,026	0,043	0,041
May-11	22,45	18,05	13,62	9,39	0,027	0,042	0,039
Jun-11	21,96	17,52	13,19	9,12	0,027	0,041	0,038
Jul-11	21,41	16,95	12,78	8,88	0,027	0,040	0,036
Aug-11	20,81	16,37	12,37	8,71	0,027	0,038	0,034

Data	Espessura Saturada (m)				Gradiente Horizontal (m/m)		
	P19	P18	P17	P16	P19-18	P18-17	P17-16
Sep-11	20,21	15,85	12,02	8,46	0,027	0,036	0,033
Oct-11	19,62	15,35	11,69	8,30	0,026	0,035	0,032
Nov-11	18,97	14,79	11,29	8,07	0,025	0,033	0,030
Dec-11	18,55	14,50	11,24	8,15	0,025	0,031	0,029
Jan-12	18,65	14,67	11,39	8,23	0,024	0,031	0,030
Feb-12	19,53	15,62	12,12	8,56	0,024	0,033	0,033
Mar-12	19,61	15,55	11,96	8,39	0,025	0,034	0,033
Apr-12	19,14	15,03	11,56	8,17	0,025	0,033	0,032
May-12	18,69	14,60	11,23	8,05	0,025	0,032	0,030
Jun-12	18,26	14,21	11,00	8,02	0,025	0,031	0,028
Jul-12	18,28	14,30	11,11	8,02	0,024	0,030	0,029
Aug-12	18,18	14,19	10,95	7,82	0,024	0,031	0,029
Sep-12	17,86	13,87	10,68	7,62	0,024	0,030	0,029
Oct-12	17,51	13,55	10,45	7,50	0,024	0,030	0,027
Nov-12	17,18	13,26	10,25	7,40	0,024	0,029	0,027
Dec-12	16,89	13,03	10,14	7,49	0,023	0,027	0,025
Jan-13	17,02	13,31	10,60	8,06	0,023	0,026	0,024
Feb-13	17,91	14,28	11,26	8,08	0,022	0,029	0,030
Mar-13	17,80	14,08	11,00	7,92	0,023	0,029	0,029
Apr-13	17,57	13,81	10,74	7,75	0,023	0,029	0,028
May-13	17,43	13,55	10,54	7,60	0,024	0,029	0,027
Jun-13	17,23	13,34	10,40	7,58	0,024	0,028	0,026
Jul-13	17,11	13,22	10,28	7,42	0,024	0,028	0,027
Aug-13	16,92	13,03	10,11	7,25	0,024	0,028	0,027
Sep-13	16,69	12,82	9,94	7,11	0,024	0,027	0,026
Oct-13	16,48	12,67	9,90	7,23	0,023	0,026	0,025
Nov-13	16,28	12,52	9,77	7,07	0,023	0,026	0,025
Dec-13	16,10	12,38	9,65	6,93	0,023	0,026	0,025
Jan-14	15,96	12,28	9,55	6,80	0,022	0,026	0,026
Feb-14	15,83	12,18	9,44	6,64	0,022	0,026	0,026
Mar-14	15,70	12,08	9,37	6,64	0,022	0,026	0,025
Apr-14	15,54	11,97	9,28	6,54	0,022	0,026	0,026
May-14	15,41	11,87	9,18	6,43	0,022	0,026	0,026
Jun-14	15,31	11,79	9,09	6,34	0,021	0,026	0,026
Jul-14	15,18	11,68	8,98	6,21	0,021	0,026	0,026
Aug-14	15,03	11,55	8,85	6,09	0,021	0,026	0,026

APÊNDICE E – Variação de armazenamento, Fluxo lateral, Percolação profunda e Recarga direta.

Data	Dados médios mensais - Mét. iWTF			
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. profunda	Rec. direta
Sep-04	-10,95	9,40	1,89	0,33
Oct-04	-28,82	20,29	8,56	0,03
Nov-04	-23,54	17,54	8,01	2,01
Dec-04	45,59	14,66	3,31	63,57
Jan-05	269,79	13,93	0,00	283,72
Feb-05	136,48	51,85	3,85	192,19
Mar-05	-45,51	68,24	6,68	29,40
Apr-05	-50,14	58,57	8,39	16,81
May-05	-45,12	58,49	0,00	13,37
Jun-05	-51,79	51,62	5,09	4,93
Jul-05	-51,25	47,16	6,57	2,48
Aug-05	-46,99	43,08	4,97	1,06
Sep-05	-42,10	38,25	3,94	0,08
Oct-05	-38,93	36,02	3,00	0,09
Nov-05	-33,15	31,41	3,19	1,44
Dec-05	-31,56	29,25	3,79	1,48
Jan-06	-2,09	27,42	2,22	27,54
Feb-06	17,33	27,91	0,00	45,24
Mar-06	24,42	34,98	0,00	59,40
Apr-06	22,68	37,48	0,00	60,16
May-06	-1,50	40,46	0,00	38,96
Jun-06	-28,78	36,41	0,04	7,66
Jul-06	-33,69	33,72	8,54	8,57
Aug-06	-26,89	30,18	0,97	4,26
Sep-06	-24,96	25,32	1,68	2,04
Oct-06	-19,55	23,16	0,56	4,17
Nov-06	-15,32	21,09	0,00	5,78
Dec-06	51,96	19,96	0,00	71,92
Jan-07	327,08	43,58	0,00	370,66
Feb-07	182,38	62,12	0,00	244,49
Mar-07	-27,99	74,25	3,37	49,63
Apr-07	-16,30	68,99	0,00	52,70
May-07	-45,80	66,85	0,00	21,05
Jun-07	-53,39	58,93	0,10	5,64
Jul-07	-50,16	54,09	2,88	6,81
Aug-07	-7,39	49,20	0,00	41,81

Data	Dados médios mensais - Mét. iWTF			
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. profunda	Rec. direta
Sep-07	-32,80	48,04	0,00	15,24
Oct-07	-46,48	46,27	1,90	1,70
Nov-07	-19,21	40,15	0,10	21,04
Dec-07	4,43	41,27	0,00	45,70
Jan-08	25,22	41,49	0,00	66,70
Feb-08	81,94	45,09	0,00	127,04
Mar-08	122,65	59,50	0,00	182,15
Apr-08	-42,71	61,36	3,33	21,99
May-08	-57,49	57,12	3,54	3,18
Jun-08	-48,25	49,57	0,84	2,16
Jul-08	-46,95	46,88	0,93	0,86
Aug-08	-43,06	42,88	1,47	1,29
Sep-08	-40,49	38,60	2,89	1,00
Oct-08	-37,57	37,27	1,49	1,19
Nov-08	-36,10	32,92	3,58	0,41
Dec-08	-18,94	30,94	1,63	13,62
Jan-09	70,89	29,33	0,00	100,22
Feb-09	130,12	39,67	0,00	169,80
Mar-09	25,89	56,18	1,78	83,84
Apr-09	-44,17	49,82	2,13	7,78
May-09	-44,49	46,91	2,64	5,06
Jun-09	-44,06	41,72	4,69	2,36
Jul-09	-40,65	38,79	2,48	0,63
Aug-09	-35,08	34,64	2,02	1,58
Sep-09	-15,81	29,42	0,36	13,97
Oct-09	-14,95	28,24	0,00	13,29
Nov-09	-5,74	29,78	0,00	24,04
Dec-09	86,42	32,41	0,00	118,83
Jan-10	139,65	49,70	0,00	189,35
Feb-10	105,59	55,98	0,00	161,58
Mar-10	-19,00	62,46	2,16	45,62
Apr-10	-29,76	54,46	1,96	26,66
May-10	-38,83	53,01	0,53	14,71
Jun-10	-49,09	46,56	3,72	1,19
Jul-10	-48,70	43,28	5,49	0,07
Aug-10	-46,20	39,04	7,15	0,00
Sep-10	-39,46	34,19	5,27	0,00
Oct-10	-37,39	31,60	5,85	0,06
Nov-10	-29,99	27,78	3,12	0,90
Dec-10	47,74	26,72	1,56	76,02
Jan-11	465,43	45,69	0,00	511,12
Feb-11	78,08	78,03	2,19	158,31
Mar-11	-71,89	69,02	26,61	23,74
Apr-11	-73,02	43,53	32,82	3,33
May-11	-56,03	38,15	17,88	0,00
Jun-11	-54,96	32,45	22,51	0,00
Jul-11	-58,32	28,54	29,78	0,00
Aug-11	-56,83	24,16	32,67	0,00

Data	Dados médios mensais - Mét. iWTF			
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. profunda	Rec. direta
Sep-11	-50,21	20,03	30,18	0,00
Oct-11	-58,51	17,72	40,79	0,00
Nov-11	-50,97	14,54	36,43	0,00
Dec-11	1,82	12,29	9,11	23,21
Jan-12	40,56	13,95	0,91	55,41
Feb-12	73,63	19,42	1,16	94,21
Mar-12	-52,68	20,08	32,60	0,00
Apr-12	-36,86	15,84	27,27	6,25
May-12	-60,80	13,98	48,38	1,56
Jun-12	-14,66	10,73	9,58	5,66
Jul-12	11,21	11,86	0,44	23,50
Aug-12	-31,91	12,27	20,22	0,59
Sep-12	-33,35	10,68	22,67	0,00
Oct-12	-32,48	9,34	23,14	0,00
Nov-12	-28,62	7,70	20,92	0,00
Dec-12	-8,93	6,55	9,77	7,40
Jan-13	104,28	6,34	1,19	111,81
Feb-13	7,04	12,20	7,23	26,47
Mar-13	-33,91	13,01	20,95	0,05
Apr-13	-23,02	11,58	13,13	1,70
May-13	-23,19	8,90	14,29	0,00
Jun-13	-15,65	7,15	8,53	0,03
Jul-13	-15,71	7,18	8,61	0,08
Aug-13	-23,09	6,76	16,33	0,00
Sep-13	-19,72	5,68	14,73	0,69
Oct-13	-14,13	4,84	10,48	1,20
Nov-13	-17,83	4,92	12,91	0,00
Dec-13	-13,85	5,08	8,77	0,00
Jan-14	-12,92	5,42	7,50	0,00
Feb-14	-12,00	5,15	6,90	0,06
Mar-14	-11,77	5,55	6,55	0,33
Apr-14	-12,99	5,41	7,58	0,00
May-14	-11,01	5,85	5,17	0,00
Jun-14	-11,61	5,91	5,70	0,00
Jul-14	-13,96	6,17	7,79	0,00
Aug-14	-16,76	6,32	10,43	0,00

Ano hidrológico	Dados anuais - Mét. iWTF			
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. profunda	Rec. direta
2005	97,75	454,824	102,68	609,89
2006	-174,27	403,48	65,21	254,89
2007	300,56	567,551	29,25	876,70
2008	-102,70	579,624	54,40	489,05
2009	-114,64	476,784	77,98	387,48
2010	63,59	524,346	57,40	609,31
2011	113,36	479,852	269,88	773,48
2012	-229,39	182,702	243,61	210,39
2013	-126,64	107,401	158,86	147,52
2014	-168,55	66,302	98,37	2,27

Data	Dados médios mensais - Mét. Darcy		
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. direta
Sep-04	-9,52	10,58	0,00
Oct-04	-28,14	21,76	0,00
Nov-04	-22,57	19,00	1,10
Dec-04	63,71	25,76	87,60
Jan-05	285,84	70,55	355,00
Feb-05	135,69	54,08	194,30
Mar-05	-61,15	31,15	0,00
Apr-05	-51,01	22,52	0,00
May-05	-48,44	20,49	0,00
Jun-05	-54,69	17,35	0,00
Jul-05	-52,56	15,49	0,00
Aug-05	-47,09	17,90	0,00
Sep-05	-42,43	14,63	0,00
Oct-05	-39,74	15,25	0,00
Nov-05	-32,91	15,04	0,00
Dec-05	-30,69	17,46	0,00
Jan-06	5,02	16,62	27,90
Feb-06	27,83	21,68	48,50
Mar-06	33,16	28,61	59,70
Apr-06	20,21	26,23	45,30
May-06	-7,74	26,27	19,60
Jun-06	-33,69	21,93	0,00
Jul-06	-37,95	22,30	2,00
Aug-06	-29,33	21,09	0,80

Data	Dados médios mensais - Mét. Darcy		
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. direta
Sep-06	-26,17	21,19	0,00
Oct-06	-19,82	24,86	4,00
Nov-06	-14,90	24,02	6,70
Dec-06	69,78	22,22	89,70
Jan-07	365,62	55,23	419,00
Feb-07	162,81	66,44	227,70
Mar-07	-44,25	55,30	18,20
Apr-07	-26,84	40,55	14,40
May-07	-51,93	34,93	0,00
Jun-07	-57,64	29,59	0,00
Jul-07	-52,14	24,23	0,00
Aug-07	-4,44	28,33	23,10
Sep-07	-34,16	27,03	0,00
Oct-07	-48,23	28,04	0,00
Nov-07	-15,75	23,42	9,90
Dec-07	8,80	31,17	38,30
Jan-08	30,74	30,69	60,20
Feb-08	86,64	38,68	123,20
Mar-08	126,56	44,56	169,40
Apr-08	-55,11	41,28	4,40
May-08	-63,60	32,10	0,00
Jun-08	-51,26	25,58	0,00
Jul-08	-49,06	24,79	0,00
Aug-08	-43,68	24,84	0,00
Sep-08	-40,07	20,55	0,00
Oct-08	-37,92	21,84	0,00
Nov-08	-36,26	19,21	0,00
Dec-08	-15,30	19,60	12,20
Jan-09	94,15	26,17	118,70
Feb-09	142,37	35,18	176,30
Mar-09	11,35	48,71	63,80
Apr-09	-51,52	36,40	0,00
May-09	-50,20	31,61	0,00
Jun-09	-47,38	26,19	0,00
Jul-09	-43,56	23,67	0,00
Aug-09	-36,39	19,73	0,00

Data	Dados médios mensais - Mét. Darcy		
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. direta
Sep-09	-12,27	22,16	10,60
Oct-09	-11,02	29,75	17,10
Nov-09	-2,02	27,52	24,80
Dec-09	108,24	31,83	138,70
Jan-10	144,82	47,27	190,70
Feb-10	101,83	53,25	153,80
Mar-10	-35,73	44,36	19,60
Apr-10	-35,66	34,91	11,80
May-10	-44,20	34,79	3,10
Jun-10	-53,19	29,69	0,00
Jul-10	-51,49	27,13	0,00
Aug-10	-48,08	24,16	0,00
Sep-10	-40,61	20,93	0,00
Oct-10	-38,28	22,51	0,00
Nov-10	-29,44	21,81	0,00
Dec-10	69,78	25,10	96,00
Jan-11	496,59	58,29	553,50
Feb-11	52,69	68,79	129,00
Mar-11	-112,50	41,84	0,00
Apr-11	-86,86	32,55	0,00
May-11	-59,72	28,88	0,00
Jun-11	-58,24	21,42	0,00
Jul-11	-60,30	22,63	0,00
Aug-11	-56,06	17,80	0,00
Sep-11	-48,80	17,88	0,00
Oct-11	-56,80	18,13	0,00
Nov-11	-48,89	16,28	0,00
Dec-11	11,11	15,57	32,10
Jan-12	50,23	18,57	66,70
Feb-12	72,17	28,47	99,10
Mar-12	-52,89	26,89	0,00
Apr-12	-40,12	21,49	7,20
May-12	-60,61	16,72	1,80
Jun-12	-12,09	12,03	6,60
Jul-12	13,68	16,36	28,20
Aug-12	-34,01	14,10	0,40

Data	Dados médios mensais - Mét. Darcy		
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. direta
Sep-12	-34,07	13,94	0,00
Oct-12	-32,24	14,66	0,00
Nov-12	-27,99	13,54	0,00
Dec-12	-1,91	10,28	12,50
Jan-13	126,98	12,39	137,60
Feb-13	2,80	27,44	32,70
Mar-13	-37,29	22,67	0,00
Apr-13	-28,46	17,87	0,00
May-13	-25,03	17,29	0,00
Jun-13	-16,21	13,23	0,60
Jul-13	-16,72	15,57	1,20
Aug-13	-23,68	15,12	0,00
Sep-13	-19,18	15,48	2,00
Oct-13	-11,43	12,41	2,40
Nov-13	-16,94	12,52	0,00
Dec-13	-13,23	13,55	0,90
Jan-14	-12,41	15,27	0,80
Feb-14	-11,99	13,45	1,70
Mar-14	-10,77	12,78	2,00
Apr-14	-12,00	15,36	1,40
May-14	-10,92	15,29	2,60
Jun-14	-11,79	13,61	1,00
Jul-14	-14,06	13,73	0,00
Aug-14	-17,11	13,31	0,00

Ano hidrológico	Dados anuais - Mét. Darcy		
	Var. armazenamento	Fluxo Lateral	Rec. direta
2005	110,07	326,63	638,00
2006	-168,26	247,13	203,80
2007	300,08	426,88	802,80
2008	-108,09	372,20	405,40
2009	-110,72	328,86	371,00
2010	61,24	406,82	570,20
2011	77,05	382,56	778,50
2012	-207,02	222,49	242,10
2013	-113,87	193,99	184,60
2014	-161,82	166,77	14,80

APÊNDICE F – Levantamento topográfico.

Cota e distância obtida entre os poços 19 e 16			
Estacas	Cotas (m)	Distancias (m)	Dist. Acumulada (m)
RN (P19)	730,00	0,00	0,00
E1	729,07	48,80	48,80
E2	727,70	60,80	109,60
E3 (P18)	726,13	55,20	164,80
E4	724,24	41,10	205,90
E5	722,23	29,60	235,50
E6	720,53	24,60	260,10
E7 (P17)	719,72	10,00	270,10
E8	717,16	31,10	301,20
E9	714,94	25,20	326,40
E10	712,24	28,60	355,00
E11 (P16)	709,90	22,80	377,80

Cota e distancia obtida entre os poços 19 e 26			
Estacas	Cotas (m)	Distancias (m)	Dist. Acumulada (m)
RN (P19)	730,00	0,00	0,00
E1	730,13	47,90	47,90
P.24 / 25	729,93	63,90	111,80
P26	729,83	27,80	139,60

APÊNDICE G – Índice Meteorológico de Seca.

Ano Hidrológico	Precipitação (mm)	SPI
1979/1980	1346,7	-0,62
1980/1981	1557,4	0,27
1981/1982	1831,0	1,43
1982/1983	2282,1	3,35
1983/1984	1605,2	0,47
1984/1985	1679,6	0,79
1985/1986	1457,0	-0,16
1986/1987	1296,7	-0,84
1987/1988	1251,4	-1,03
1988/1989	1175,4	-1,35
1989/1990	1437,4	-0,24
1990/1991	1562,1	0,29
1991/1992	1377,0	-0,50
1992/1993	1446,3	-0,20
1993/1994	1200,5	-1,25
1994/1995	1651,8	0,67
1995/1996	1571,5	0,33
1996/1997	1541,3	0,20
1997/1998	1500,2	0,03
1998/1999	1401,1	-0,39
1999/2000	1140,3	-1,50
2000/2001	1709,6	0,92
2001/2002	1761,5	1,14
2002/2003	1176,6	-1,35
2003/2004	1544,7	0,22
2004/2005	1444,4	-0,21
2005/2006	1208,7	-1,21
2006/2007	1707,9	0,91
2007/2008	1356,0	-0,59
2008/2009	1397,1	-0,41
2009/2010	1571,3	0,33
2010/2011	1862,1	1,56
2011/2012	1578,4	0,36
2012/2013	1517,3	0,10
2013/2014	1137,1	-1,51

ANEXO A – Curvas de Distribuição Granulométrica

USP	DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS	EESC
PENEIRAMENTO DE MATERIAL GRANULAR - MB 32		
LOCAL :	Fazenda Monte Alegre	
AMOSTRA :	1	PROF. (m) : 4,0
IDENT./CLASSIF. :		
OPERADOR :	Gomes	DATA : -

DADOS DA AMOSTRA <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">MASSA DE SÓLIDOS :</td> <td style="text-align: center;">g</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">$M_{s,0}$:</td> <td style="text-align: center;">214,64</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">ΣM_s (#) :</td> <td style="text-align: center;">214,12</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">ΔM_s :</td> <td style="text-align: center;">0,52</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">$\Delta M_s (\leq 2,0) \%$:</td> <td style="text-align: center;">0,2</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">VIBRADOR/AGITADOR :</td> <td style="text-align: center;">Agitador</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">TEMPO min. :</td> <td style="text-align: center;">10,0</td> </tr> </table> <div style="border: 1px solid black; height: 80px; padding: 5px;">OBSERVAÇÃO :</div>	MASSA DE SÓLIDOS :	g	$M_{s,0}$:	214,64	ΣM_s (#) :	214,12	ΔM_s :	0,52	$\Delta M_s (\leq 2,0) \%$:	0,2	VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador	TEMPO min. :	10,0	PENEIRAMENTO <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>M_s (#) g</th> <th>P_r (#) %</th> <th>ΣP_r (#) %</th> <th>P_p (#) %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 1/2"</td><td>0,00</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>1"</td><td>0,00</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>0,00</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>0,00</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,00</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,29</td><td>0,14</td><td>0,14</td><td>99,9</td></tr> <tr><td>16</td><td>1,18</td><td>0,55</td><td>0,68</td><td>99,3</td></tr> <tr><td>30</td><td>10,42</td><td>4,85</td><td>5,54</td><td>94,5</td></tr> <tr><td>50</td><td>42,75</td><td>19,92</td><td>25,46</td><td>74,5</td></tr> <tr><td>100</td><td>92,46</td><td>43,08</td><td>68,53</td><td>31,5</td></tr> <tr><td>200</td><td>43,62</td><td>20,32</td><td>88,86</td><td>11,1</td></tr> <tr><td>Prato</td><td>23,40</td><td>10,90</td><td>99,76</td><td>0,2</td></tr> </tbody> </table>	#	M_s (#) g	P_r (#) %	ΣP_r (#) %	P_p (#) %	1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0	1"	0,00	0,0	0,0	100,0	3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0	3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0	4	0,00	0,0	0,0	100,0	10	0,29	0,14	0,14	99,9	16	1,18	0,55	0,68	99,3	30	10,42	4,85	5,54	94,5	50	42,75	19,92	25,46	74,5	100	92,46	43,08	68,53	31,5	200	43,62	20,32	88,86	11,1	Prato	23,40	10,90	99,76	0,2
MASSA DE SÓLIDOS :	g																																																																															
$M_{s,0}$:	214,64																																																																															
ΣM_s (#) :	214,12																																																																															
ΔM_s :	0,52																																																																															
$\Delta M_s (\leq 2,0) \%$:	0,2																																																																															
VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador																																																																															
TEMPO min. :	10,0																																																																															
#	M_s (#) g	P_r (#) %	ΣP_r (#) %	P_p (#) %																																																																												
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0																																																																												
1"	0,00	0,0	0,0	100,0																																																																												
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0																																																																												
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0																																																																												
4	0,00	0,0	0,0	100,0																																																																												
10	0,29	0,14	0,14	99,9																																																																												
16	1,18	0,55	0,68	99,3																																																																												
30	10,42	4,85	5,54	94,5																																																																												
50	42,75	19,92	25,46	74,5																																																																												
100	92,46	43,08	68,53	31,5																																																																												
200	43,62	20,32	88,86	11,1																																																																												
Prato	23,40	10,90	99,76	0,2																																																																												

Porcentagem que passa (%) vs. Tamanho dos Grãos (mm)

SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: right;">D (10) mm :</td><td style="text-align: center;">0,070</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">D (30) mm :</td><td style="text-align: center;">0,150</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">D (60) mm :</td><td style="text-align: center;">0,240</td></tr> </table>	D (10) mm :	0,070	D (30) mm :	0,150	D (60) mm :	0,240	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: right;">C_u :</td><td style="text-align: center;">3,4</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">C_c :</td><td style="text-align: center;">1,34</td></tr> </table>	C_u :	3,4	C_c :	1,34	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">UNIFORME</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">BEM GRADUADA</td></tr> </table>	UNIFORME	BEM GRADUADA
D (10) mm :	0,070													
D (30) mm :	0,150													
D (60) mm :	0,240													
C_u :	3,4													
C_c :	1,34													
UNIFORME														
BEM GRADUADA														

USP

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

EESC

PENEIRAMENTO DE MATERIAL GRANULAR - MB 32

LOCAL :	Fazenda Goiabal		
AMOSTRA :	2	PROF. (m) :	4,9
IDENT./CLASSIF. :			
OPERADOR :	Gomes	DATA :	-

DADOS DA AMOSTRA

MASSA DE SÓLIDOS :	g
$M_{s,0}$:	236,15
ΣM_s (#__) :	236,14
ΔM_s :	0,01
$\Delta M_s (\leq 2,0)$ % :	0,0

VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador
TEMPO min. :	10,0

OBSERVAÇÃO :

PENEIRAMENTO

#	M_s (#__) g	P_r (#__) %	ΣP_r (#__) %	P_p (#__) %
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0
4	0,00	0,0	0,0	100,0
10	0,00	0,00	0,00	100,0
16	0,03	0,01	0,01	100,0
30	1,35	0,57	0,58	99,4
50	33,45	14,16	14,75	85,3
100	44,81	18,98	33,72	66,3
200	128,80	54,54	88,27	11,7
Prato	27,70	11,73	100,00	0,0

NBR 6502/95

SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

D (10) mm :	0,070
D (30) mm :	0,095
D (60) mm :	0,145

C_u : 2,1

MEDIANAMENTE UNIFORME

C_c : 0,89

MAL GRADUADA

USP

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

EESC

PENEIRAMENTO DE MATERIAL GRANULAR - MB 32

LOCAL :	Fazenda Monte Alegre		
AMOSTRA :	3	PROF. (m) :	7,6
IDENT./CLASSIF. :			
OPERADOR :	Gomes	DATA :	-

DADOS DA AMOSTRA

MASSA DE SÓLIDOS :	g
$M_{s,0}$:	176,92
ΣM_s (# _) :	176,75
ΔM_s :	0,17
$\Delta M_s (\leq 2,0)$ % :	0,1

VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador
TEMPO min. :	10,0

OBSERVAÇÃO :

PENEIRAMENTO

#	M_s (# _) g	P_r (# _) %	ΣP_r (# _) %	P_p (# _) %
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0
4	0,00	0,0	0,0	100,0
10	0,25	0,14	0,14	99,9
16	0,96	0,54	0,68	99,3
30	6,71	3,79	4,48	95,5
50	29,63	16,75	21,22	78,8
100	77,96	44,07	65,29	34,7
200	33,46	18,91	84,20	15,8
Prato	27,78	15,70	99,90	0,1

NBR 6502/95

SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

D (10) mm :	0,060
D (30) mm :	0,130
D (60) mm :	0,220

C_u : 3,7

C_c : 1,28

UNIFORME

BEM GRADUADA

USP

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

EESC

PENEIRAMENTO DE MATERIAL GRANULAR - MB 32

LOCAL :	Fazenda Santa Maria da Fábrica		
AMOSTRA :	4	PROF. (m) :	14,8
IDENT./CLASSIF. :			
OPERADOR :	Gomes	DATA :	-

DADOS DA AMOSTRA

MASSA DE SÓLIDOS :	g
$M_{s,0}$:	205,47
ΣM_s (#__) :	205,01
ΔM_s :	0,46
$\Delta M_s (\leq 2,0)$ % :	0,2

VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador
TEMPO min. :	10,0

OBSERVAÇÃO :

PENEIRAMENTO

#	M_s (#__) g	P_r (#__) %	ΣP_r (#__) %	P_p (#__) %
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0
4	0,00	0,0	0,0	100,0
10	0,00	0,0	0,0	100,0
16	0,07	0,0	0,0	100,0
30	2,30	1,1	1,2	98,8
50	21,78	10,6	11,8	88,2
100	78,90	38,4	50,2	49,8
200	60,86	29,6	79,8	20,2
Prato	41,10	20,0	99,8	0,2

SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

D (10) mm :	0,050
D (30) mm :	0,093
D (60) mm :	0,180

C_u : 3,6

C_c : 0,96

UNIFORME

MAL GRADUADA

USP

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

EESC

PENEIRAMENTO DE MATERIAL GRANULAR - MB 32

LOCAL :	Plantação Eucalipto - P9/10		
AMOSTRA :	5	PROF. (m) :	17,2
IDENT./CLASSIF. :			
OPERADOR :	Gomes	DATA :	-

DADOS DA AMOSTRA

MASSA DE SÓLIDOS :	g
$M_{s,0}$:	115,02
ΣM_s (# _) :	115,02
ΔM_s :	0,00
$\Delta M_s (\leq 2,0)$ % :	0,0

VIBRADOR/AGITADOR :	Agitador
TEMPO min. :	10,0

OBSERVAÇÃO :

PENEIRAMENTO

#	M_s (# _) g	P_r (# _) %	ΣP_r (# _) %	P_p (# _) %
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0
4	0,00	0,0	0,0	100,0
10	0,39	0,34	0,34	99,7
16	0,99	0,86	1,20	98,8
30	17,84	15,51	16,71	83,3
50	58,81	51,13	67,84	32,2
100	15,68	13,63	81,47	18,5
200	9,00	7,82	89,30	10,7
Prato	12,31	10,70	100,00	0,0

NBR 6502/95

SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

D (10) mm :	0,070
D (30) mm :	0,270
D (60) mm :	0,440

 C_u : 6,3 C_c : 2,37

MEDIANAMENTE UNIFORME

BEM GRADUADA