

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**MONITORAMENTO DA GERAÇÃO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS EM
INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS PELO MÉTODO DO BALANÇO
HÍDRICO**

JOEL DIAS DA SILVA

Orientador: Armando Borges de Castilhos Jr.

Co-Orientador: Péricles Alves de Medeiros

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

FLORIANÓPOLIS – SC

Março de 2002

**“MONITORAMENTO DA GERAÇÃO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS EM
INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS PELO MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO”**

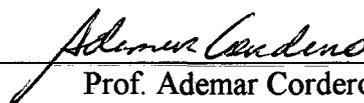
JOEL DIAS DA SILVA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental

Aprovado por:



Prof. Ademar Cordero, Dr.



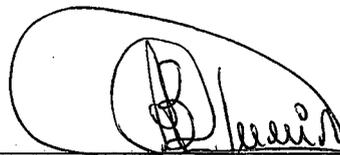
Prof. Henrique de Melo Lisboa, Dr.



Prof. Pécles Alves Medeiros, Dr.
(Co-Orientador)



Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.
(Coordenador)



Prof. Armando Borges de Castilhos Jr., Dr.
(Orientador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
MARÇO/2002

Dedicatória:

À minha família:

Pelo incentivo, apoio e amor demonstrados durante o decorrer deste trabalho.

Aos meus irmãos e amigos:

Por demonstrarem o que deveras significam tais palavras.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Armando Borges de Castilhos Junior, pela orientação, companheirismo e valiosas contribuições;

Ao Professor Péricles Alves Medeiros, pela contribuição durante o decorrer do projeto;

À Companhia de Melhoramentos da Capital – COMCAP, na pessoa do Engenheiro Edmar (Assessoria Técnica), pela colaboração durante a fase de preparação dos trabalhos;

Ao Professor Paulo Modesto Filho, pelo constante apoio e incentivo;

Aos amigos do Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos: Maria Cristina, Giancarlo, Karina, Andreza, Francine, Elivete, Keli, Paulo e Débora;

Aos amigos: Paulo Jerônimo e Glades, Ananda Quevedo, Raquel Finkler, Gersina Nobre e Darciane Kerkhoff;

Aos meus familiares pela compreensão e incentivo durante todos estes anos de estudo, ajudando-me a fixar alvos meritórios e por manter os meus pés no chão;

Aos meus grandes amigos: Vilson Gonçalves e Família, Eliú Ordahi e Família, Jorge Luís Simeão e Família, Hilário Silva e Família. Amizade é deveras preciosa. Make it last forever!!!!

Ao nosso Querido e Amado Deus Jeová, por toda boa dádiva e presente perfeito e principalmente pelo maravilhoso privilégio da vida e pela oportunidade de servirmos quais Testemunhas de seus maravilhosos atos poderosos.

**“Deus é para nós refúgio e força, uma ajuda
encontrada prontamente durante aflições”**

Salmo 46:1

*Tradução do Novo Mundo das Escrituras
Sagradas*

RESUMO

O significativo crescimento e concentração populacional nas áreas urbanas, aliado à forte industrialização ocorrida nos últimos anos contribuíram de forma efetiva para o aumento sempre crescente na produção de resíduos das mais diversas naturezas, notadamente os resíduos sólidos urbanos, que tem tido como consequência maior a deterioração ambiental com sérias implicações na qualidade de vida do homem. Neste sentido, e, sabendo-se que a produção de resíduos é crescente, torna-se imperativo assegurar o seu gerenciamento através das estratégias de gestão destes materiais. Assim, o presente trabalho surge inserido num projeto de pesquisa sobre aspectos tecnológicos do processo de *aterros sanitários* – que no decorrer dos anos tem-se mostrado um método de destinação final de resíduos urbanos bastante popular – focalizando a problemática existente nos municípios de pequeno porte, que muitas vezes não contam com tratamentos de valorização ou um sistema adequado de destinação final de seus resíduos. Foi elaborado um programa de pesquisas a partir de uma instalação piloto de campo (três células de aterro sanitário) contendo resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta regular da cidade, com o objetivo de estabelecer métodos simplificados de previsão da geração de líquidos percolados em aterros sanitários e, conseqüentemente, disponibilizar dados técnicos para o adequado projeto de redes de drenagem na base dos aterros sanitários e, igualmente, das instalações de tratamento dos efluentes líquidos gerados nestes. Nesse sentido, foram monitorados diariamente os componentes do balanço hídrico, bem como a produção de líquidos percolados gerados durante o período de 12 de maio de 2001 até 07 de janeiro de 2002, perfazendo um total de 240 dias. O teor de umidade inicial da massa de resíduos aterrada foi igual a 55,2%. Após a disposição dos resíduos nas células e sua posterior compactação manual, o peso específico em cada uma das células foi de: 325,21 kg/m³ na Célula 01; 298,29 kg/m³ na Célula 02 e 343,93 kg/m³ na Célula 03. No total foram produzidos 3267,49 litros de líquidos percolados durante o período de estudo. A média mensal de produção de percolados foi de 408,436 litros e a diária de 13,61 litros e, o auge na produção de percolados deu-se nos meses com maior incidência de chuvas e a baixa na produção

durante os meses de estiagem. O total acumulado do parâmetro Precipitação durante o período da pesquisa foi de 930,026 mm, sendo que o maior valor mensal registrado se deu no 5º mês e o menor no 8º mês. Do valor total acumulado, em termos de média em oito meses, esta seria de 116,253 mm e a diária de 3,875mm. A evaporação acumulada durante a pesquisa foi de 233,544 mm, com média mensal de 29,193 mm. Comparando-se tais dados obtidos em campo com métodos usados para a estimativa na geração de líquidos percolados, observa-se que estes constituem uma ferramenta importante para estas previsões das quantidades de líquidos percolados gerados em aterro sanitário. Verifica-se, outrossim, a necessidade de complementação de dados através do desenvolvimento de estudos sobre escoamento superficial em solos reais e, igualmente, da capacidade de campo do solo e dos resíduos. Finalmente, este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos da UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, em parceria com a COMCAP – Companhia Melhoramentos da Capital, projeto financiado pela FINEP/CNPq no contexto do Tema III do Edital III do PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Aterros Sanitários, Líquidos Percolados, Balanço Hídrico

ABSTRACT

The significance of the growth and population concentration in urban areas, together with the strong industrialization process that occurs lately, are contributing in an effective way to a large and increased solid waste production. From the large variety of wastes, it was observed the explosive growth of the urban solid waste, as a consequence of environment deterioration and having serious impact on life quality of humans. Knowing the fact that the waste production is a continuously increasing process makes necessary and imperative to implement strategies in order to obtain a good and proper management of the solid waste. In this way, the present thesis work makes part from a research project about technological aspects of the sanitary landfills process – shown along the passing years to be a popular method for the final destination of urban waste –focusing the existing problem in small municipalities, which often do not use an adequate system for final destination of the solid waste or counting with the valorization treatments of the waste. Within the research schedule of the project, was elaborated a soil pilot plant (tree cells of sanitary landfill) containing urban solid waste provided from the regular collection system of the town. The objective was to establish simplified prediction methods for the leachate production in sanitary landfills, consequently to generate technical data for the project of drainage networks of the sanitary landfills and treatment installation of the obtained liquid effluents. In this way, the components of water balance were daily monitored, as the production of leachates during the period between May 12th, 2001 and January 7th, 2002 representing a total period of 240 days. The content of the initial moisture of the landfilled waste mass was equal to 55,2%. After the disposal of waste in each cell and a manual compaction of the waste, the specific weight in one was: 325,21 kg/m³ in cell number 01, 298,29 kg/m³ in cell number 02 and 343,93 kg/m³ in cell number 3. The total leachate production during the study period was of 3267,49 liters. The average monthly leachate production was of 408,436 liters, the daily leachate production was of 13,61 liters and the leachate peak production was observed during the months with larger precipitation incidence and the lowest one during the draught period. The total

accumulated of precipitation parameter during the studied period was about 930,026 mm, considering that the highest monthly rainfall was registered during the 5th month and the lowest value during the 8th month. From this total accumulated value, the 8-months average was about 116,253 mm and daily was about 3,875 mm. The accumulated evaporation during the research period was 233,544 mm, with the monthly average of 29,193 mm. Comparing the field data with the used methods for the estimation of the leachate production, it can be observed that this represents an important tool for quantitative prediction of leachate production of sanitary landfills. Consequently it is outlined the necessity of data complementation developing studies about superficial runoff in real soils and studies on the field and waste capacity. Finally, the present work was developed in the Research Laboratory for Waste Solids of the Federal University of Santa Catarina in partnership with COMCAP- Company of Capital Improvements, project financed by FINEP/CNPq in the framework of III Thema of the III Edital of PROSAB- Research Schedule of Basic Sanitation.

Key words: Urban Solid Wastes, Landfill Sites, Leachate, Water Balance Method.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	5
1.2 Objetivos Específicos.....	5

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos.....	7
2.1.1 Introdução.....	7
2.1.2 Definições, Classificações, Quantidades e Características dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	7
2.2 Principais Técnicas de Disposições Final e Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	9
2.2.1 Reciclagem de Matéria Orgânica (Compostagem e Vermicompostagem) e Tratamentos Térmicos.....	9
2.2.2 A Disposição Final Via Aterros Sanitários.....	11
2.3 Degradação dos Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários.....	14
2.3.1 Introdução.....	14
2.3.2 Os Mecanismos de Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários.....	17
2.3.2.1 Mecanismos Biológicos de Degradação dos Resíduos.....	17
2.3.2.2 Mecanismos Físico-Químicos de Degradação dos Resíduos.....	21
2.4 Origem e Formação dos Líquidos Percolados.....	22
2.5 Fatores que Afetam a Formação dos Líquidos Percolados.....	23
2.6 Estimativa de Produção e Características dos Líquidos Percolados..	24
2.7 Geração de Líquidos Percolados: Conceito e Técnicas.....	25
2.7.1 Introdução.....	25
2.7.2 Método do Balanço Hidrológico Desenvolvido por Thornthwaite.....	26
2.7.3 Método Suíço.....	26
2.7.4 Método do Balanço Hídrico Desenvolvido pela EPA/US.....	27

2.8	Instalações Piloto para Simulação de Aterros Reais.....	32
-----	---	----

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
---------------------------------	-----------

3.1	Estudo do Balanço Hídrico em Aterros Sanitários: Principais Parâmetros a Serem Monitorados.....	34
3.1.1	Precipitação.....	34
3.1.2	Escoamento Superficial.....	37
3.1.3	Infiltração.....	37
3.1.4	Evaporação.....	38
3.1.5	Volume de Líquidos Percolados.....	41
3.1.6	Recalque.....	41
3.1.7	Temperatura.....	42
3.2	Projeto e Construção do Aparato Experimental: Células Piloto de Composto Simulando um Aterro Sanitário.....	42
3.3	Definição do Substrato (Resíduos Urbanos) e do Material de Cobertura (Solo) para o Estudo.....	45
3.4	Operação do Aparato Experimental: Preenchimento com Resíduos, com Material de Cobertura e Monitoramento do Sistema.....	47
3.4.1	Principais Características do Substrato (Resíduos Urbanos) e do Material (Solo) de Cobertura.....	47
3.4.2	Precipitação.....	48
3.4.3	Escoamento Superficial.....	49
3.4.4	Infiltração.....	49
3.4.5	Evaporação.....	49
3.4.6	Volume de Líquidos Percolados.....	49
3.4.7	Recalque.....	50
3.4.8	Temperatura.....	50

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
------------------------------------	-----------

4.1	Características dos Resíduos Urbanos e do Material de Cobertura Utilizado na Instalação do Piloto.....	51
-----	--	----

4.1.1	Amostra de Resíduos.....	51	
4.1.2	Material de Cobertura das Células.....	58	
4.2	Resultados do Monitoramento dos Parâmetros do Balanço Hídrico e Outros na Instalação Experimental	60	
4.2.1	Precipitação.....	60	
4.2.2	Evaporação.....	63	
4.2.3	Volume de Líquidos Percolados.....	65	
4.2.4	Recalque.....	71	
4.2.5	Temperatura.....	73	
4.3	Balanço Hídrico do Sistema, Estudo de Correlações e Comparações com o Método Suíço.....	73	
4.3.1	Balanço Hídrico Geral do Sistema.....	73	
4.3.2	Estudo de Correlações entre Parâmetros do Balanço Hídrico.....	76	
4.3.2.1	Precipitação e Líquidos Percolados.....	76	
4.3.2.2	Outras Correlações.....	77	
4.3.3	Comparações com o Método do Balanço Hídrico.....	78	
4.3.4	Comparações com o Método Suíço.....	81	
4.4	Generalização dos Resultados do Estudo Experimental e Aplicações.	82	
CAPÍTULO V			
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....			83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....			86
ANEXOS.....			93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagnóstico de Tratamento de Resíduos Urbanos no Brasil 2002.....	1
Figura 2	Estratégias de Gerenciamento de Resíduos Urbanos.....	2
Figura 3	Esquema Geral do Processo de Degradação dos Resíduos Urbanos.....	14
Figura 4	Efeitos da Atividade Microbiológica sobre os Resíduos Urbanos.	16
Figura 5	Produtos Intermediários do Processo de Degradação dos Resíduos Urbanos.....	17
Figura 6	Produtos Finais do Processo de Degradação dos Resíduos Urbanos.....	18
Figura 7	Fluxograma do Processo de Decomposição Anaeróbia dos Resíduos Urbanos.....	19
Figura 9	Piloto de Estudo de Evaporação.....	40
Figura 10	Vista Esquemática das Células.....	43
Figura 11	Configuração das Células.....	44
Figura 12	Vista Superior das Células.....	44
Figura 13	Vista das Células.....	45
Figura 16	Curva Granulométrica do Solo de Cobertura.....	60
Figura 17	Precipitação Diária sobre as Células.....	61
Figura 18	Precipitação Acumulada Durante o Período de Monitoramento...	63
Figura 19	Evaporação Diária.....	64
Figura 20	Evaporação Acumulada.....	64
Figura 21	Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 01.....	66
Figura 22	Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 02.....	66
Figura 23	Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 03.....	67
Figura 24	Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 01.....	69
Figura 25	Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 02.....	70
Figura 26	Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 03.....	70
Figura 27	Recalque na Célula 01.....	71

Figura 28	Recalque na Célula 02.....	71
Figura 29	Recalque na Célula 03.....	72
Figura 30	Balanço Hídrico Geral do Sistema.....	73
Figura 31	Comparação da Precipitação com Líquidos Percolados.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de K para Aplicação do Método Suíço.....	27
Tabela 2	Condições Básicas para Utilização do Método do Balanço Hídrico.....	30
Tabela 3	Parâmetros Meteorológicos e Outros Dados Utilizados no Método do Balanço Hídrico.....	30
Tabela 4	Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial.....	31
Tabela 5	Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos das Células.....	51
Tabela 6	Composição Gravimétrica do Roteiro K8V.....	53
Tabela 7	Análise Qualitativa do Roteiro K8V.....	55
Tabela 8	Análise Granulométrica do Material de Cobertura.....	59
Tabela 9	Valores da Precipitação do dia 1-90.....	94
Tabela 10	Valores da Precipitação do dia 91-180.....	94
Tabela 11	Valores da Precipitação do dia 181-240.....	95
Tabela 12	Evaporação Registrada do dia 1-90.....	97
Tabela 13	Evaporação Registrada do dia 91-180.....	97
Tabela 14	Evaporação Registrada do dia 181-240.....	98
Tabela 15	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Primeiro Mês de Observação.....	100
Tabela 16	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Segundo Mês de Observação.....	100
Tabela 17	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Terceiro Mês de Observação.....	100
Tabela 18	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Quarto Mês de Observação.....	101
Tabela 19	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Quinto Mês de Observação.....	101
Tabela 20	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Sexto Mês de Observação.....	101
Tabela 21	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Sétimo Mês	102

	de Observação.....	
Tabela 22	Produção Total de Líquidos Percolados Durante o Oitavo Mês de Observação.....	102
Tabela 23	Recalques registrados do dia 1-30.....	104
Tabela 24	Recalques registrados do dia 31-60.....	104
Tabela 25	Recalques registrados do dia 61-90.....	104
Tabela 26	Recalques registrados do dia 91-120.....	105
Tabela 27	Recalques registrados do dia 121-150.....	105
Tabela 28	Recalques registrados do dia 151-180.....	105
Tabela 29	Recalques registrados do dia 181-210.....	106
Tabela 30	Recalques registrados do dia 211-240.....	106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

O significativo crescimento e concentração populacional nas áreas urbanas, aliado à forte industrialização ocorrida nos últimos anos contribuíram decisivamente para o aumento vertiginoso na produção de resíduos das mais diversas naturezas, notadamente os resíduos sólidos urbanos, o que determinou um processo contínuo de deterioração ambiental com sérias implicações na qualidade de vida do homem.

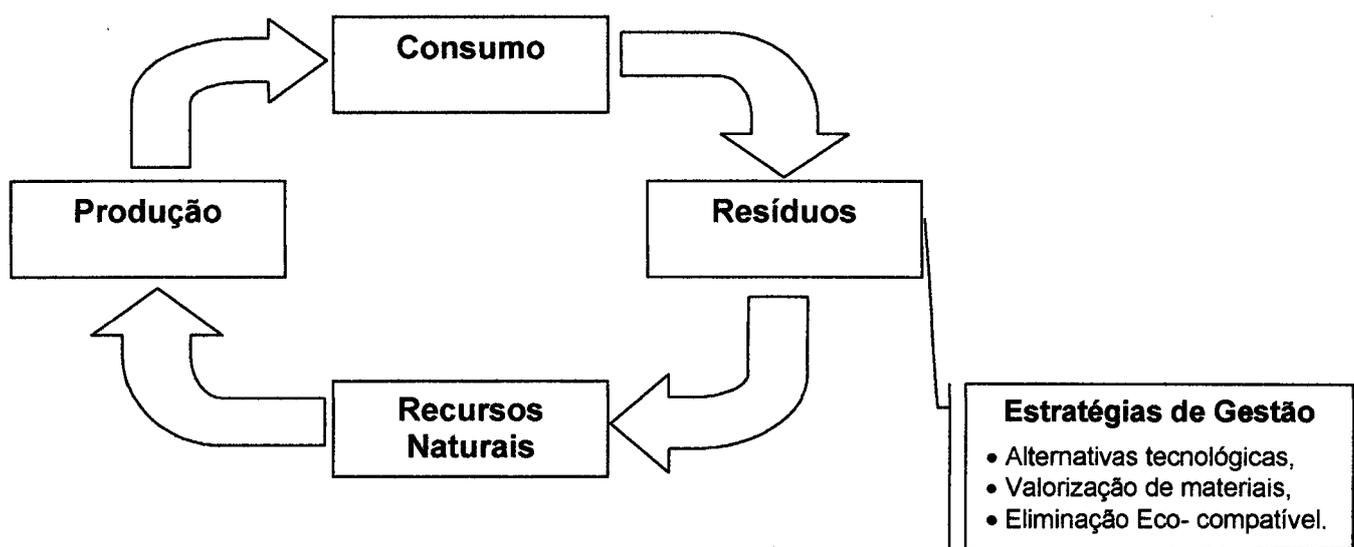
No Brasil, os dados disponíveis atualmente indicam a seguinte situação dos resíduos sólidos, como se vê na Figura 1 (IBGE, 2002):

Quantidade diária de lixo coletado (t/dia) : 228.413,0	
Vazadouro a céu aberto (lixões)	48.321,70
Vazadouros em áreas alagadas	232,60
Aterro Controlado	84.575,50
Aterro Sanitário	82.640,30
Estação de Compostagem	6.549,70
Estação de Triagem	2.265
Incineração	1.031,80
Locais não-fixos	1.230,20
Outras	1.566,20

Fonte: (IBGE, 2002)

Verifica-se que, grande parte dos resíduos produzida diariamente recebe algum tipo de tratamento de final, mas que ainda é grande a quantidade de resíduos dispostos a céu aberto na forma de lixões, sem contar que, muitos dos aterros ditos “controlados” acabam ficando sem supervisão e agravando ainda mais a situação.

Rejeitados nos corpos d'água, concentrados nos depósitos e aterros ou dispersos no solo, estes materiais constituem um problema de grande complexidade. Neste sentido, e, sabendo-se que a produção de resíduos é crescente, torna-se imperativo assegurar o seu gerenciamento através das estratégias de gestão destes materiais. Uma gestão racional das atividades econômicas e sociais não pode ser concebida sem a tomada de consciência desta realidade. A busca de uma solução para este problema deve obedecer a princípios rigorosos e, quando se confrontam com resíduos, três estratégias são possíveis, como podem ser vistas na Figura 2:



Avaliar as possibilidades de modificação ou de abandono de certos processos industriais ou de modos de consumo geradores de resíduos (ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS).

Assegurar segundo todos os protocolos possíveis, a VALORIZAÇÃO dos resíduos, isto é, procurar um valor econômico positivo destes ou de uma fração do resíduo em áreas variadas : energia, agricultura, matérias primas, etc...

ELIMINAÇÃO de maneira compatível com os meios naturais e a saúde dos seres vivos, dos resíduos que não encontraram utilizações possíveis no quadro da valorização (mais propriamente, operações de ESTOCAGEM no meio natural).

Figura 2 – Estratégias de Gerenciamento de Resíduos Urbanos.

Estes dados demonstram a magnitude dos problemas na área de resíduos urbanos e a necessidade de realização de trabalhos técnicos – científicos para o equacionamento da problemática, e, particularmente no que se tange ao tratamento via aterro sanitário. Na abordagem do aterro sanitário do ponto de vista científico, várias indagações ainda estão na expectativa de respostas.

Assim, o presente trabalho surge inserido num projeto de pesquisa sobre aspectos tecnológicos do processo de *aterros sanitários* para pequenos municípios, que se encontra em desenvolvimento na UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, em parceria com a COMCAP – Companhia Melhoramentos da Capital, projeto financiado pela FINEP/CNPq no contexto do Tema III do Edital III do PROSAB – Programa de Saneamento Básico. Neste contexto, verifica-se que um aterro sanitário constitui-se na reinserção no meio natural, nas melhores condições possíveis, dos resíduos sólidos que não foram objeto de outros tratamentos de valorização ou de eliminação.

Os resíduos urbanos acumulados de maneira contínua em aterros não são, contudo, inativos. Esta mistura de uma grande variedade química, sob a influência de agentes naturais (chuva e microrganismos) é objeto de evoluções complexas, constituídas pela superposição de mecanismos físicos, químicos e biológicos. Além da dissolução dos elementos minerais e o carreamento pela água de percolação das finas partículas e do material solúvel, o principal fator que contribui na degradação dos resíduos é a bioconversão de matéria orgânica em formas solúveis e gasosas.

O conjunto destes fenômenos conduz, geralmente, a geração de metabólitos gasosos e ao carreamento pela água de moléculas muito diversas que estão na origem da formação dos líquidos percolados e do biogás. A poluição advinda da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros é crescente, e os líquidos percolados são um dos principais vetores desta poluição. Dessa forma, o tratamento desses líquidos percolados assume grande importância ambiental.

poluição. Dessa forma, o tratamento desses líquidos percolados assume grande importância ambiental.

Para o tratamento adequado é fundamental que se conheçam qualitativamente e quantitativamente as características desses líquidos que apresentam grande variabilidade em sua composição e quantidade gerada, elevada demanda de oxigênio (DQO), compostos orgânicos e substâncias tóxicas (SEGATO e SILVA, 2000).

Para o conhecimento das quantidades de líquidos percolados gerados em um aterro sanitário, faz-se necessário determinar todos os fatores que contribuem para a sua formação, o que pode ser feito através de um balanço hídrico nestas instalações de tratamento, que corresponde à soma de quantidades que entram e a subtração de quantidades de água que são consumidas nas reações químicas e a quantidade de água que deixa o aterro como vapor. A quantidade potencial de líquidos percolados corresponderá à quantidade de água que excede a capacidade de retenção de umidade do material aterrado (TCHOBANOGLOUS et al, 1993).

A partir desta premissa inicial e para estudo do balanço hídrico em um aterro sanitário, foi elaborado um programa de pesquisas a partir de uma instalação piloto de campo (três células de aterro sanitário) contendo resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta regular da cidade, no qual foram monitorados diariamente os componentes do balanço hídrico, bem como a produção de líquidos percolados, durante um período de 240 dias.

No que tange organização desta dissertação, a mesma observa a seguinte estrutura :

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica que procurou focalizar pontos como a problemática dos resíduos sólidos na atualidade e as principais técnicas de disposição final e tratamento. Também foram pesquisados os mecanismos de biodegradação dos resíduos com ênfase na formação dos líquidos percolados e métodos de previsão qualitativa de sua geração.

No Capítulo III, é apresentada a metodologia da pesquisa, onde foram definidos os parâmetros envolvidos no balanço hídrico aplicado a aterros sanitários e seu monitoramento.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos durante o período de estudo, realizado de 12 de maio de 2001 até 07 de janeiro de 2002 e a discussão dos mesmos, embasados na literatura corrente. Igualmente, realiza uma avaliação dos métodos propostos para a estimativa de geração de líquidos percolados em aterros sanitários usados atualmente e também do trabalho desenvolvido durante os meses de pesquisa.

Finalmente, o capítulo V apresenta as principais conclusões e recomendações para realização de trabalhos futuros de pesquisas e, em seguida, apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

1.1. Objetivo Geral

Estabelecer métodos simplificados de previsão da geração de líquidos percolados em aterros sanitários em escala piloto e, conseqüentemente, disponibilizar dados técnicos para o adequado projeto de redes de drenagem na base dos aterros sanitários em escala real e, igualmente, das instalações de tratamento desses efluentes líquidos.

1.2. Objetivos Específicos

- desenvolvimento de uma instalação em escala piloto susceptível de simular um aterro sanitário real e proporcionar a medição dos parâmetros do balanço hídrico,

- realizar o estudo amplo e monitoramento dos principais parâmetros do balanço hídrico (pluviometria, escoamento superficial, infiltração, evaporação) nas células piloto,
- determinar a quantidade de líquidos percolados gerados na instalação piloto em função das características dos resíduos urbanos depositados e das condições operacionais do piloto,
- estabelecer relações comparativas com outros métodos de determinação de líquidos percolados em aterros sanitários, em particular, com o denominado “método suíço”.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Resíduos Sólidos Urbanos

2.1.1. Introdução

A ausência de oportunidades de trabalho e de acesso a terra nas zonas rurais, de serviços públicos (educação e saúde) mais adequados, combinados a maiores oportunidades de emprego, levaram um número cada vez maior de pessoas a migrar para as cidades. Com isso, o acelerado processo de urbanização aliado ao consumo crescente de produtos, provocou um sensível aumento do volume e diversificação dos resíduos urbanos gerados e sua concentração espacial.

Os impactos ambientais originários da geração e disposição inadequada desses resíduos têm aumentado, na medida em que, na composição dos resíduos gerados nas cidades - domiciliares, industriais, comerciais, hospitalares, varrição e poda - são acrescentados os lodos provenientes das estações de tratamento de água e de esgotos.

Um dos maiores desafios atuais é o desenvolvimento de programas de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos e, igualmente, dos resíduos industriais e agrícolas. Neste processo, percebe-se igualmente a necessidade do estabelecimento de técnicas adequadas para a destinação final desses resíduos. A disposição inadequada dos resíduos sólidos acarreta na contaminação da água, ar e solo pelos poluentes gerados, tornando o local da disposição numa fonte de poluição.

2.1.2. Definições, Classificações, Quantidades e Características dos Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo a ABNT (1987), os resíduos sólidos urbanos podem ser definidos como os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente apresenta-se sob estado sólido, semi-sólido ou semilíquido (com conteúdo líquido suficiente para que este possa fluir livremente). Esta definição, segundo TEIXEIRA et al (1997), é muito ampla e equivocada ao incluir líquidos como resíduos sólidos. A norma poderia incluir os líquidos juntamente com os resíduos sólidos, quando se estivesse considerando as possíveis técnicas de tratamento e disposição final dos resíduos, e não simplesmente defini-los como resíduos sólidos.

De acordo com IPT/CEMPRE (2000), são várias as formas possíveis de se classificar os resíduos urbanos, conforme a sua natureza física (seco ou molhado); sua composição química (matéria orgânica ou inorgânica), ou ainda os seus riscos potenciais ao meio-ambiente (perigosos, não-inertes e inertes).

Segundo VIEIRA (1999) apud IPT/CEMPRE (2000), muitos estudos têm sido realizados a fim de demonstrar a evolução temporal dos resíduos, tanto em termos quantitativos como qualitativos. Assim, os seguintes fatores são definidos como os mais influentes na geração e composição dos resíduos domiciliares :

- **Nível de renda familiar:** A quantidade per capita de resíduos produzidos aumenta em proporção à renda familiar, já que quanto maior a renda maior o consumo e, conseqüentemente, mais desperdícios por sobras ou obsolências e, maior ocorrência de embalagens;
- **Industrialização de alimentos:** O crescente desenvolvimento na industrialização de alimentos também tem influenciado na tendência para maior quantidade de embalagens e menores quantidades de matéria orgânica, já que os alimentos vêm preparados para o consumo;
- **Hábitos da população:** A aquisição de alimentos em feiras livres, por exemplo, aumenta as quantidades de matéria orgânica nos resíduos.

Aumento de oferta de bebidas em embalagens sem retorno tem aumentado a participação de plásticos, latas e papelão nos resíduos;

- Fatores sazonais: Nas cidades turísticas litorâneas é conhecido o aumento da geração de resíduos sólidos domésticos no verão, devido à flutuação populacional.

2.2. Principais Técnicas de Disposição Final e Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

Para a definição do procedimento mais adequado para o tratamento dos resíduos urbanos, deve-se partir de um diagnóstico da situação atual do município, considerando-se aspectos como tipo, origem e quantidade de resíduos urbanos produzidos, tratamentos existentes e características dos locais onde esses resíduos são dispostos.

2.2.1 Reciclagem de Matéria Orgânica (Compostagem e Vermicompostagem) e Tratamentos Térmicos

A compostagem pode ser definida como um processo aeróbio e controlado de decomposição biológica e estabilização da matéria orgânica em condições que permitam o desenvolvimento de temperaturas termofílicas (controladas para não ultrapassarem valores máximos em torno de 65 °C) resultantes de uma produção calorífica de origem biológica.

O produto final deve apresentar características de estabilidade do ponto de vista biológico, ser higiênico e rico em compostos húmicos e cuja utilização, no solo, não ofereça riscos ao meio ambiente (MUSTIN, 1987). Há muito tempo a compostagem é praticada no meio rural, utilizando-se de restos vegetais e esterco animal. Pode-se, também, utilizar a fração orgânica do lixo domiciliar, mas de forma controlada, em instalações industriais chamadas usinas de triagem e compostagem.

No contexto brasileiro, a compostagem tem grande importância, uma vez que cerca de 50% do lixo municipal é constituído por matéria orgânica. (IPT/CEMPRE, 2000). A compostagem surge como uma alternativa interessante não só pelo aproveitamento da fração orgânica biodegradável dos resíduos, que pode ser tratada (estabilizada) e transformada num composto orgânico de excepcional qualidade, o húmus, como também por contribuir à minimização dos impactos ambientais, ao aumento de vida útil dos aterros sanitários e geração de empregos (MODESTO FILHO, 1999).

A vermicompostagem é uma técnica da compostagem onde são utilizadas minhocas para a produção do composto, que recebe o nome de vermicomposto. As minhocas ingerem a matéria orgânica previamente compostada, excretando-a em adiantado estado de humificação, com grande disponibilização de nutrientes e capacidade de absorção de umidade.

Adicionalmente, o húmus produzido apresenta características quelantes e adsorptivas, que podem ser utilizadas como instrumento de atenuação de elementos refratários existentes em resíduos de origem industrial (TEIXEIRA e BIDONE, 1999). Segundo MODESTO FILHO (1999), esta técnica compreende dois estágios distintos :

- No primeiro, há uma degradação ativa da matéria orgânica com aumento da temperatura (fase termofílica), não devendo a temperatura ultrapassar 65 °C, momento em que ocorre a redução dos microrganismos patogênicos.
- Na segunda fase, uma vez reduzida e estabilizada a temperatura, o material pode ser transferido para leitos rasos, onde se pode manter a temperatura em níveis adequados (inferior a 30 °C) para evitar demasiada compactação e então proceder à inoculação das minhocas, dando início a vermicompostagem.

Esta técnica pode ser vantajosa não só por acelerar a maturação (formação de complexos húmicos) como também por melhorar a qualidade do composto produzido.

O maior benefício da vermicompostagem, utilizando substratos alternativos, consiste primeiramente em melhorar as propriedades físicas do solo, como a estrutura, favorecendo o arejamento do mesmo. E, em segundo, a reciclagem de materiais considerados rejeitos, dando uma destinação racional a grande parte de resíduos antes encaminhados aos depósitos de lixo à céu aberto, os chamados "lixões". Um terceiro benefício está relacionado com a produção de minhocas, a minhocultura, uma atividade que se revela promissora as que nela se empenham (SCHALCH, 1999).

Por outro lado, os tratamentos térmicos podem ser classificados como sendo de alta ou de baixa temperatura. Os tratamentos de alta temperatura normalmente ocorrem a temperaturas acima de 500 °C e objetivam, principalmente, a destruição ou remoção da fração orgânica presente no resíduo, com redução significativa da sua massa (70%) e volume (90%), bem como a sua assepsia. A energia contida nos resíduos, nestes processos, pode ser parcialmente aproveitada, podendo gerar energia elétrica, água quente e vapor, ou combustíveis alternativos, auxiliando na redução do custo operacional do tratamento térmico (IPT/CEMPRE, 2000).

A incineração é uma das tecnologias térmicas existentes para tratamento de resíduos: é a queima de materiais em alta temperatura (geralmente acima de 900 °C), em mistura com uma quantidade apropriada de ar e durante um tempo pré-determinado. No caso de incineração dos resíduos urbanos, compostos orgânicos são reduzidos a seus constituintes minerais, principalmente, dióxido de carbono gasoso e vapor d'água e a sólidos inorgânicos (cinzas). É um processo de redução de peso e volume dos resíduos através de combustão controlada (TEIXEIRA e BIDONE, 1999).

2.2.2 A Disposição Final via Aterros Sanitários

Ao longo dos tempos e com a evolução da ciência, o homem identificou nos resíduos por ele gerados uma fonte de diversas doenças e de seus vetores, passando a destiná-los a locais determinados, afastados do seu ambiente, sob a forma do que hoje se convencionou chamar de “lixões a céu aberto”, que ainda podem ser encontrados na maioria dos municípios brasileiros. Esta forma de disposição final de resíduos sólidos é inadequada, e caracteriza-se pela simples descarga de qualquer tipo de resíduo sobre o solo, sem nenhuma medida de proteção à saúde pública e ao meio ambiente.

Outra forma conhecida de disposição final de resíduos é a do aterro controlado, o qual é preconizado pela NBR – 8849/85. É uma técnica que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, não causando desse modo danos ou riscos à saúde pública. Porém, pelo fato de não dispor de impermeabilização da base e nem de sistemas de tratamento de líquidos percolados ou de dispersão dos gases gerados, pode causar poluição localizada.

Uma forma correta e segura para a disposição final de resíduos sólidos é o aterro sanitário. Segundo a ABNT (1984) “é uma técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível, e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário.

O aterro sanitário tem sido utilizado por muitas décadas como uma forma de disposição final de resíduos: residencial, comercial, e industrial, tanto inócuos como perigosos. A tecnologia em aterros sanitários tem avançado muito desde o início do uso desta técnica, evoluindo de depósitos de queima a aterros altamente projetados para minimizar os impactos de contaminantes presentes nos resíduos em áreas adjacentes (FARQUHAR, 1988).

O principal problema ambiental dos aterros sanitários é o risco potencial de poluição de águas subterrâneas e a subsequente influência na qualidade das águas de superfície. A carga total de poluentes dependerá da quantidade e da qualidade da água que percola através do aterro sanitário e atinge as águas subterrâneas (BENGTSSON et al, 1994). Dentre os procedimentos operacionais mais importantes em um aterro sanitário, estão a drenagem e o tratamento dos líquidos e também a impermeabilização da área onde os resíduos serão depositados, de forma a evitar que tais líquidos percolem através do solo e alcancem o lençol freático (CAPELO NETO et al, 1999).

Pode-se afirmar que a célula de um aterro funciona como um reservatório de líquidos, que, enquanto tiver capacidade de reter umidade, não liberará o líquido para as camadas inferiores. A este limite superior de água que uma camada de resíduos urbanos pode reter, dá-se o nome de capacidade de campo. Esta denominação é derivada daquela que se utiliza para descrever a capacidade de armazenamento de água no solo. Muito pouco ou quase nenhum líquido percolado escoará da massa de resíduo confinada na célula do aterro até que se atinja a capacidade de campo. Esta pequena produção, anterior à saturação do meio, é principalmente devida à liberação da umidade inicial dos resíduos urbanos sujeito à compressão na célula confinada (IPT/CEMPRE, 2000).

A infiltração de líquidos percolados nas águas subterrâneas e o escoamento superficial destes para as águas de superfície apresentam um potencial adverso de impactos ambientais (RADEMAKER e YOUNG, 1980). A melhoria das técnicas de aterro sanitário tem visado principalmente à redução na produção de líquidos percolados, a sua coleta e tratamento, e diminuição das descargas destes no solo. Quer o lixiviado seja coletado e tratado ou se permita a sua descarga no solo, é essencial que se estime o seu fluxo quantitativo e concentração em poluentes e, ainda, a variação destas características com o tempo enquanto o aterro se desenvolve, de sua abertura até o seu fechamento (FARQUHAR, 1988).

A poluição potencial de uma área de disposição final de resíduos deve ser considerada no seu projeto e sua locação. O entendimento dos fatores e das condições envolvidas na produção de líquidos percolados é necessário para a sua eliminação e controle. Os maiores impactos ambientais, resultantes da disposição de resíduos sólidos municipais dentro de um aterro sanitário, ocorrem quando a água que passa através dos resíduos acumula vários contaminantes. Este percolado pode entrar em contato com as águas subterrâneas subjacentes e degradar seriamente a qualidade de água do aquífero (LU et al., 1985).

2.3. Degradação dos Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários

2.3.1. Introdução

A evolução dos resíduos urbanos em aterro sanitário constitui-se em um fenômeno global que conduz, via de regra, a formação de líquidos percolados e de biogás, cuja complexidade está relacionada à interdependência dos numerosos fatores de meio. O processo de degradação dos compostos orgânicos e inorgânicos é um fenômeno constituído essencialmente pela superposição de mecanismos *biológicos* e *físico-químicos*, catalisados pelo fator água, presente nos resíduos pela umidade inicial e pela águas das precipitações que ocorrem quando estes estão dispostos em aterro sanitário. O esquema abaixo, Figura 3, resume os fenômenos que ocorrem.

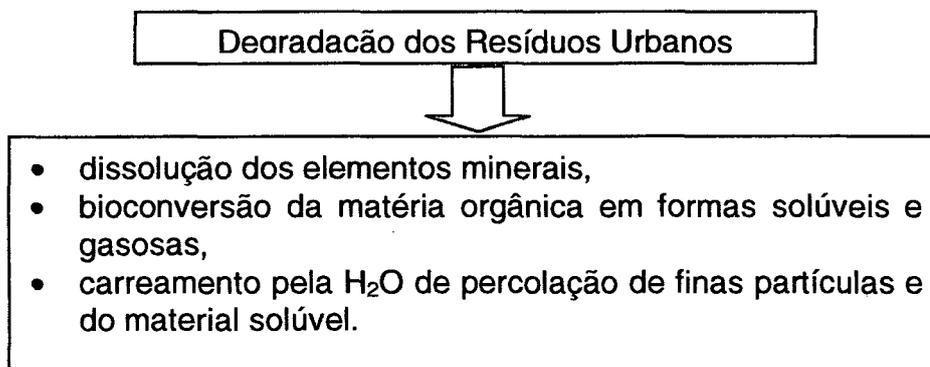


Figura 3 – Esquema Geral do Processo de Degradação dos Resíduos Urbanos

Durante o processo de degradação biológica dos resíduos urbanos, a suscetibilidade ao carreamento ou arraste de substâncias pela água de chuva que se infiltra e escoar se modifica drasticamente. Este processo de carreamento denomina-se lixiviação.

Por meio desse processo, os compostos arrastados do interior da massa de resíduos dão origem aos líquidos percolados, com composição diversa. As reações bioquímicas que ocorrem no interior da massa de resíduos urbanos em decomposição modificam as substâncias, tornando-as mais ou menos suscetíveis ao arraste pelo líquido que percola pelo resíduo.

Dessa forma, a composição dos líquidos percolados se altera, dependendo bastante da fase em que se encontra o processo (IPT/CEMPRE, 2000). As transformações ocorridas durante a degradação da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos são do tipo biológico e pode realizar-se aerobicamente ou anaerobicamente, segundo a disponibilidade de oxigênio. A principal diferença entre as reações de conversão aeróbia e anaeróbia está na natureza dos seus produtos finais (PINEDA, 1998).

Os mecanismos biológicos de degradação dos resíduos urbanos em aterro sanitário são implementados a partir da presença de microorganismos heterótrofos, os quais oxidam substratos orgânicos para suas necessidades energéticas. Os metabolismos predominantes são o metabolismo aeróbio e anaeróbio, os quais estão condicionados à disponibilidade de oxigênio gasoso de origem atmosférica nas camadas de resíduos (BORGES DE CASTILHOS, 2000).

No metabolismo aeróbio, os microorganismos se desenvolvem em presença de oxigênio molecular ou excepcionalmente incorporado a elementos minerais (nitratos). Os principais microorganismos são as bactérias, leveduras e fungos. No metabolismo anaeróbio, os microorganismos se desenvolvem na ausência de oxigênio, podendo entretanto, ser tolerado (anaeróbios facultativos) ou não (anaeróbios estritos).

Os principais microrganismos são as bactérias. A decomposição microbiológica da parcela orgânica biodegradável presente nos resíduos poderá gerar umidade, que contribuirá para a produção de líquidos percolados no aterro sanitário (LU et al, 1985). Porém, observa-se que esta geração de água é praticamente desprezível.

Por outro lado, os gases gerados no processo biológico de decomposição dos resíduos em um aterro sanitário, de acordo com diversos pesquisadores do tema, são: amoníaco, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, ácido sulfídrico, metano, nitrogênio e oxigênio, assim como ácidos graxos voláteis.

O dióxido de carbono e o metano são os principais gases produzidos pela decomposição anaeróbia dos componentes. A Figura 4 resume os principais efeitos da atividade microbiológica sobre os resíduos urbanos em aterro sanitário (BORGES DE CASTILHOS, 2000).

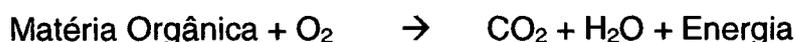
Tipos de Efeitos	Natureza dos Efeitos
Efeitos Diretos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geração de produtos solúveis: <ul style="list-style-type: none"> • minerais; • orgânicos; ▪ geração de produtos gasosos; ▪ produção de biomassa em excesso.
Efeitos Indiretos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ efeitos sobre as condições de meio: <ul style="list-style-type: none"> • pH; • óxido-redução; • temperatura, e influência destas condições sobre : <ul style="list-style-type: none"> • solubilização da matéria sólida; • precipitação de espécies. ▪ reações químicas e físico-químicas dos produtos com o resíduo ou seus produtos.

Figura 4 – Efeitos da Atividade Microbiológica Sobre os Resíduos Urbanos

2.3.2. Os Mecanismos de Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários

2.3.2.1 Mecanismos Biológicos de Degradação dos Resíduos

Logo após a cobertura do aterro, ainda há a presença de ar e, portanto, de oxigênio, aprisionado no interior da célula confinada. Os microrganismos aeróbios, ou seja, aqueles que utilizam oxigênio na decomposição da matéria orgânica, dão início à primeira das fases do processo de decomposição dos resíduos urbanos. As principais reações do metabolismo aeróbio são :



Resumidamente, as matérias orgânicas são submetidas à ação de enzimas extracelulares, secretadas pelos microorganismos hidrolíticos. Estes degradam as moléculas insolúveis de grande porte em moléculas de menor tamanho, e solúveis (produtos intermediários). Apresenta-se abaixo, nas Figuras 5 e 6, os principais produtos intermediários e finais do processo de degradação aeróbia e seus efeitos (BORGES DE CASTILHOS, 2000):

Natureza da Matéria Degradada	Principais Classes de Produtos Intermediários
Proteínas	Polipeptídeos, ácidos aminados
Graxas	Ácidos graxos
Hidratos de Carbono	Polissacarídeos, açúcares, aldeídos
Hidrocarbonetos	Ácidos graxos, aldeídos

Figura 5 – Produtos Intermediários do Processo de Degradação dos Resíduos Urbanos

Principais efeitos : poluição dos líquidos percolados, através das matérias orgânicas, globalmente medidas através da DQO, DBO₅ e COT; ação

complexante de certos produtos (ácidos aminados e compostos amino-carboxílicos) sobre os metais; estimulação da atividade biológica (contaminação bacteriana).

Elementos Constituintes da Matéria Orgânica	Produtos Finais da Biodegradação Aeróbia
H	Água H ₂ O
C	Gás carbônico CO ₂ , bicarbonatos e Carbonatos
N	Nitratos NO ₃ ⁻
P	Fosfato PO ₄ ³⁻
S	Sulfatos SO ₄ ⁻⁻
Metais	Seus hidróxidos ou carbonatos

Figura 6 – Produtos do Finais do Processo de Degradação dos Resíduos

Urbanos

Principais efeitos : influência do CO₂, dos carbonatos e dos bicarbonatos sobre o pH do meio aquoso e sua capacidade tampão ácido-base em função do pH, insolubilização dos íons metálicos sob forma de hidróxidos, fosfatos, carbonatos pouco solúveis, ou, solubilização destes metais; liberação de elementos eutrofizantes para as águas (nitrato e fosfatos).

A decomposição aeróbia é relativamente curta, aproximadamente um mês, consumindo rapidamente a quantidade limitada de oxigênio presente. De acordo com LO (1996), em aterros pouco profundos (inferiores a 3m) ou quando se garante um suprimento extra de oxigênio, esta fase pode perdurar um tempo maior. No decorrer da fase, ocorre uma grande liberação de calor. A temperatura do aterro sobe acima daquela encontrada no ambiente. Os líquidos percolados produzidos nesta fase apresentarão elevadas concentrações de sais de alta solubilidade dissolvidos no líquido resultante.

A elevação da temperatura pode ocasionar, também, a formação de sais contendo metais, pois muitos íons são solúveis em água em temperaturas elevadas. Nesta fase dá-se, também, grande formação de gás carbônico (CO₂) e hidrogênio, particularmente se a umidade no interior da massa de resíduos urbanos for baixa (LO, 1996). Após a diminuição da quantidade de oxigênio, começam a predominar microrganismos anaeróbios facultativos, ou seja,

Esses microrganismos são chamados de bactérias acetogênicas. O fluxograma geral do processo de decomposição anaeróbio é mostrado na Figura 7 (BORGES DE CASTILHOS, 2000). Segundo FORESTI et al. (1999), estas bactérias, primeiramente, convertem o material orgânico particulado, como a celulose e outros materiais putrescíveis, em compostos dissolvidos, num processo denominado hidrólise ou liquefação (primeira fase). Segue-se a acidogênese (segunda fase), que se caracteriza por ser um processo bioquímico pelo qual as bactérias obtêm energia pela transformação da matéria orgânica hidrolisada, contudo sem mineralizá-la.

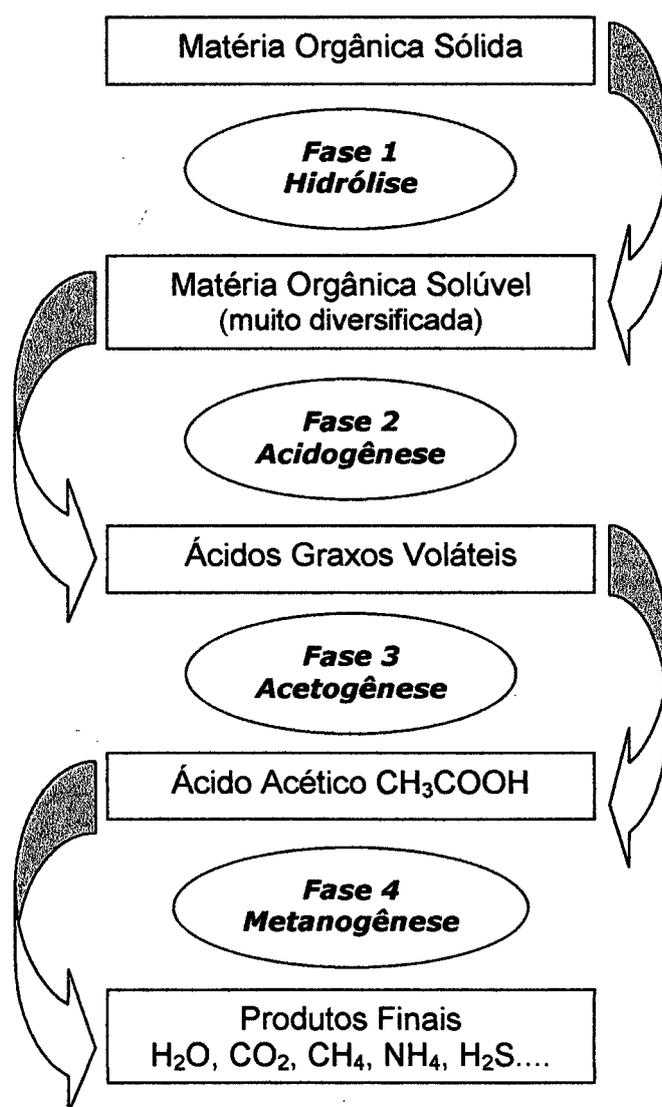


Figura 7 – Fluxograma do Processo de Decomposição Anaeróbia dos Resíduos Urbanos

Durante esta segunda fase, que pode perdurar por alguns anos, são produzidas quantidades consideráveis de compostos orgânicos simples e de alta solubilidade, principalmente ácidos graxos voláteis, como o ácido acético (terceira fase – produção preponderante do ácido acético) e também grandes quantidades de nitrogênio amoniacal. Estes ácidos se misturam com o líquido que percola pela massa de resíduo sólido, fazendo com que seu pH caia para valores entre 4 e 6. O caráter ácido desta mistura ajuda na solubilização de materiais inorgânicos, podendo apresentar altas concentrações de ferro, manganês, zinco, cálcio e magnésio.

Os valores baixos de pH favorecem, também, o aparecimento de maus odores, com a liberação de gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e outros gases causadores de maus odores (LIMA, 1995). Os líquidos percolados produzidos nesta fase apresentam grande quantidade de matéria orgânica. Tem, portanto, alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), valor usado para indicar a concentração de matéria orgânica em um dado volume líquido. Nesta fase, têm valores de DBO superiores a 10 g/l.

Um outro indicador da quantidade de compostos orgânicos em um líquido é a demanda química de oxigênio (DQO). Dividindo-se o valor da DBO dos líquidos percolados pelo valor da DQO do mesmo, obtêm-se valores relativamente altos, usualmente superiores a 0,7. Esses valores denotam que os líquidos percolados são relativamente biodegradáveis.

Na quarta e última fase, os compostos orgânicos simples formados na fase acetogênica, são consumidos por bactérias estritamente anaeróbias, denominadas bactérias metanogênicas, que dão origem ao metano (CH_4) e ao gás carbônico (CO_2). Estas bactérias metanogênicas desenvolvem-se preferencialmente em valores de pH próximos do neutro (pH = 7,0), entre 6,6 e 7,3. Com o consumo dos ácidos voláteis simples produzidos na fase anterior, o valor do pH, que era ácido, começa a subir, favorecendo o aparecimento deste tipo de bactéria; porém, esta é bastante sensível.

valor do pH, que era ácido, começa a subir, favorecendo o aparecimento deste tipo de bactéria; porém, esta é bastante sensível.

Uma vez estabelecido este equilíbrio no pH, qualquer acúmulo de ácidos pode provocar uma queda na quantidade de bactérias metanogênicas, prejudicando o processo de decomposição dessa terceira fase. Estando o pH próximo do neutro, reduz-se a solubilização de compostos inorgânicos, diminuindo a condutividade dos líquidos percolados, grandeza que caracteriza a capacidade do líquido de conduzir corrente elétrica (IPT/CEMPRE, 2000). Enquanto o consumo dos ácidos voláteis simples faz o pH subir, a DBO dos líquidos percolados, por sua vez, começa a baixar.

Nessa condição, a divisão do valor da DBO pelo valor da DQO resulta em valores mais baixos, o que significa menor capacidade de biodegradação dos líquidos percolados. Isso se explica pelo fato de que, nessas condições, há um acúmulo nos líquidos percolados de substâncias que são de difícil degradação biológica, como os ácidos fúlvicos e húmicos, originários da decomposição de material vegetal. Estes compostos também contribuem sobremaneira para a coloração escura dos líquidos percolados.

Embora esta divisão em fases facilite bastante o entendimento do processo de estabilização dos resíduos e seus impactos sobre a composição dos líquidos percolados, bem como sobre a composição das emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, as fases não são tão bem delimitadas, uma vez que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando uma grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro.

2.3.2.2 Mecanismos Físico-Químicos de Degradação dos Resíduos

São apresentados em seguida os principais fatores determinantes na solubilização dos componentes químicos dos resíduos sólidos:

- Transporte, mistura: transporte por convecção, difusão, gravidade;

- Reações Químicas: solubilização, complexação, hidrólise;
- Fenômenos Biológicos: efeitos diretos (metabolização), efeitos indiretos (por intermédio do pH, óxido-redução, ...)

Por outro lado, a característica do sólido e da composição da solução influencia muita a cinética de dissolução e, conseqüentemente, a concentração dos líquidos percolados. Verifica-se que a quantidade de matéria solubilizada é proporcional à superfície de interação entre o mineral e a solução. Dois casos podem ser considerados: caso de um material não poroso atacado uniformemente em sua superfície e de um material atacado em sua massa.

Em certos casos, as características da superfície externa do material são diferentes das características de sua massa, alterando assim a cinética de dissolução. Igualmente, a velocidade de dissolução pode ser fortemente reduzida pela adsorção de íons minerais ou de moléculas orgânicas na interface sólido/líquido. As características físico-químicas do meio desempenham também um papel importante na solubilização de numerosas espécies minerais. Os principais fatores podendo afetar este fenômeno são: pH, potencial de óxido-redução, complexão, temperatura.

2.4. Origem e Formação dos Líquidos Percolados

Os líquidos percolados se originam como resultado da infiltração de água ou de outros líquidos pela cobertura de solo de um aterro sanitário (ou pela co-disposição de dejetos líquidos) que percola através dos resíduos, carreando contaminantes neles contido (GEE, 1981). É uma mistura de compostos orgânicos e inorgânicos, nas suas formas dissolvidas e coloidais, formado durante a decomposição dos resíduos urbanos. É um problema de poluição potencial para as águas superficiais e, principalmente, para as águas subterrâneas. O gerenciamento do percolado deve incluir, dentre outros, o monitoramento da qualidade e das quantidades produzidas (CAMPBELL, 1993).

Os líquidos percolados são formados pela digestão de matéria orgânica sólida, por ação de exo-enzimas produzidas por bactérias. A função dessas enzimas é solubilizar a matéria orgânica para que possa ser assimilada pelas células bacterianas. A umidade tem grande influência na formação dos líquidos percolados já que um alto teor de umidade favorece a decomposição anaeróbia. A produção de líquidos percolados depende das condições peculiares de cada caso, principalmente da topografia, geologia, regime e intensidade das chuvas (SEGATO e SILVA, 2000).

2.5. Fatores que Afetam a Formação de Líquidos Percolados

Para PINEDA (1998), a formação de lixiviados dependerá, fundamentalmente, das precipitações registradas na região, da umidade e composição dos resíduos, como também da capacidade de campo que o aterro sanitário venha a alcançar. Em sua passagem, os lixiviados arrastam materiais dissolvidos em suspensão, fixos ou voláteis, o que faz com que tenham elevadas cargas orgânicas, metais pesados, ácidos, sais e microrganismos. Estas últimas características formam uma corrente altamente agressiva ao meio ambiente com um potencial de contaminação bem maior do que o de muitos despejos industriais (LEDESMA et al., 2000).

A geração de líquidos percolados geralmente ocorre pelo escoamento superficial e pela infiltração das águas de precipitações. O escoamento superficial é geralmente caracterizado por altas taxas de fluxo e por curtos períodos de contato (geralmente horas) e é o principal método de movimento físico de sólidos suspensos. Já a infiltração, é caracterizada por baixas taxas de fluxo e por um período de contato bem maior. O transporte de substâncias pelo último método, ocorre principalmente em solução (RADEMAKER & YOUNG, 1980).

A produção do lixiviado pode ser minimizada ou quase eliminada pela prevenção do contato de água com o resíduo, o que pode ser feito pelo uso de drenagem superficial e subsuperficial, e também por selecionar corretamente o material de cobertura a ser usado no aterro (LU et al., 1985).

2.6. Estimativa de Produção e Características dos Líquidos Percolados

A estimativa de produção dos líquidos percolados ao longo da vida de um aterro sanitário, bem como o tempo que levam para serem formados, são dados valiosos para minimizar o impacto destes ao meio ambiente (LEDESMA et al., 2000). Esta estimativa é também a chave para o projeto de materiais de cobertura e de impermeabilização de fundo adequados, prevenindo assim a contaminação de águas superficiais e subterrâneas (GEE, 1981).

Assim, é essencial que seja realizada uma descrição quantitativa do volume gerado de lixiviado nos aterros sanitários, para a determinação dos seus efeitos na qualidade de água e também na validade dos métodos de controle empregados (LU et al., 1985).

As características dos lixiviados estão intimamente relacionadas com a quantidade produzida, com a natureza dos resíduos e da etapa de estabilização em que se encontra, variando, portanto, de um aterro sanitário para outro, bem como da estação do ano (PINEDA, 1998).

A composição dos líquidos percolados é, por outro lado, influenciada por numerosos fatores entre os quais pode-se citar: a massa de espécies solubilizáveis (composição dos resíduos), as operações de trituração sobre os resíduos, a pluviometria, a idade dos resíduos, etc. Uma composição “padrão” dos líquidos percolados é difícil de ser estabelecida, e o resultado numérico que a literatura pode nos fornecer são válidos apenas para aterros sanitários específicos (BORGES DE CASTILHOS, 1991).

A infiltração da precipitação através do solo é um processo natural, e faz parte do ciclo de recarga do lençol freático; a percolação é a infiltração de água

através dos resíduos sólidos, carreando com ela, as substâncias solúveis do mesmo; a lixiviação é a operação que carrega substâncias contidas nos resíduos por meio de percolação. Os resíduos sólidos, inicialmente agem como uma esponja e simplesmente absorvem a água; entretanto, o material atinge um teor de umidade, conhecido como capacidade de retenção.

Qualquer acréscimo de água adicional resulta na percolação de igual quantidade da massa (OLIVEIRA & PASQUAL, 2000). O volume de lixiviado é representado como os fenômenos físicos da percolação em um maciço homogêneo constituído por um material poroso. Da água que precipita sobre o aterro, parte é devolvida à atmosfera pela evapotranspiração, outra escoada superficialmente e o restante se infiltra, podendo ficar retida na camada de cobertura e nos resíduos (ROCCA et al., 1993).

2.7. Geração de Líquidos Percolados : Conceitos e Técnicas

2.7.1. Introdução

Para projetar e operar um aterro sanitário de modo adequado, é importante determinar a quantidade e a qualidade dos líquidos percolados. Para isso, várias técnicas têm sido desenvolvidas, usando métodos de balanço de águas para estimar o conjunto de água livre em um aterro sanitário. Estes métodos consideram um balanço entre a precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e disposição dos resíduos.

Atualmente existem vários métodos tanto simplificados como mais complexos que satisfazem parcialmente esta necessidade. VEIT et al (1983) apud PINEDA (1988), desenvolveu uma expressão simples para a produção de lixiviados, baseando-se na precipitação, na superfície do terreno, num coeficiente determinado pelo grau de compactação dos resíduos e pelo desenho do aterro sanitário.

Mais recentemente, a Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos, desenvolveu o modelo HELP (Hidrologic Evaluation of Landfill Performance) que permite uma estimativa rápida e de grande aproximação na produção de lixiviados.

De acordo com HAMADA e ABEICHE (2000), o modelo HELP pode ser definido como um modelo quasi-bidimensional, que pode executar cálculos com dados diários para o balanço de água baseado em uma coluna unidimensional de um aterro.

2.7.2. Método do Balanço Hidrológico Desenvolvido por Thornthwaite

Este método está baseado na relação entre a precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e a capacidade de armazenamento de água pelo solo. A precipitação representa a quantidade de água que é adicionada ao aterro; a evapotranspiração é entendida como evaporação combinada das plantas e da superfície do solo junto com a transpiração das plantas, o que supõe uma perda de água do solo. O escoamento superficial representa a água que flui diretamente sobre a área de estudo, e a capacidade de armazenamento de água pelo solo representa a capacidade de água que pode ser armazenada pelo mesmo. Da água que precipita sobre o aterro, parte é devolvida à atmosfera pela evapotranspiração, parte escoar superficialmente e o restante infiltra, podendo ficar retida na camada de cobertura ou produzir um fluxo de percolação quando for atingida a saturação desta camada (ROOCA, 1993).

Existe uma parte do total que se forma como um subproduto na decomposição do material orgânico pela atividade bacteriana, mas esta quantidade é sensivelmente pequena, o que faz com que seja desprezada quando se faz um balanço de água do aterro sanitário.

2.7.3. Método Suíço

A vazão de líquidos percolados pode ser avaliado para os casos mais simples, pela seguinte apresentada por ROOCA (1993):

$$Q = (1/t) \cdot P \cdot A \cdot K \quad (1)$$

Onde:

Q: vazão média anual de líquido percolado (l/s);

P: precipitação anual média (mm);

A: área do aterro (m²);

t: número de segundos em 1 ano;

K: coeficiente dependente do grau de compactação dos resíduos urbanos, que pode ser obtido através da Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de K para Aplicação do Método Suíço

TIPO DE ATERRO	PESO ESPECIFICO DOS RESÍDUOS URBANOS	K
Aterros fracamente compactados	0,4 a 0,7 ton/m ³	0,25 a 0,50
Aterros fortemente compactados	Acima de 0,7 ton/m ³	0,15 a 0,25

Fonte: ROOCA, 1993.

2.7.4. Método do Balanço Hídrico Desenvolvido pela EPA/US

De acordo com FENN et al (1975), a fração da precipitação que infiltra num aterro sanitário é a principal fonte de contribuição de umidade para a geração de líquidos percolados a partir de um aterro sanitário.

Nesse sentido, condições de superfície do aterro sanitário e também das características climatológicas da região onde este se encontra, influenciarão em muito a infiltração pela cobertura de solo e qualquer subsequente percolação abaixo em direção aos resíduos sólidos.

O balanço hídrico, como desenvolvido na literatura sobre o uso e conservação do solo e da água, dependerá de condições meteorológicas (intensidade e distribuição da precipitação e da evaporação potencial), características hidráulicas, condições iniciais dos resíduos aterrados e dos processos biológicos que ocorrem dentro do aterro (BENGTSSON et al, 1994).

A precipitação representa a quantidade de água que é adicionada nesta equação. A evapotranspiração (combinação da evaporação das plantas e superfícies do solo e também da transpiração das plantas) representa o transporte de água da terra para a atmosfera, sendo o inverso da precipitação. Já o escoamento superficial representa a água que esco diretamente da área em questão. Quanto a variável capacidade de armazenamento de água no solo, como o próprio nome diz, representará a água que poderá ficar armazenada no solo (FENN et al., 1975).

Uma maneira em que o solo de cobertura de um aterro sanitário influencia a quantidade de percolação é através de sua capacidade de reter água. A quantidade de retenção dependerá principalmente do tipo de solo usado, estrutura e sua capacidade de água, assim como a profundidade da camada de solo.

Para os pesquisadores HAMADA e ABECHÉ (2000), o conteúdo de umidade no solo muda continuamente: aumenta devido à infiltração e diminui devido à evaporação/evapotranspiração. A depleção de umidade devido a evapotranspiração é limitada a uma zona de solo superior definida pela profundidade de zona efetiva de raízes das plantas. Estes ainda ressaltam, que é importante considerar a mudança no armazenamento de umidade da cobertura de solo dos aterros no método do balanço de água.

A máxima umidade que o solo pode reter contra a solicitação da força gravitacional é a capacidade de campo. A mínima umidade que o solo perde devido à vegetação é o seu conteúdo de umidade de ponto de murchamento. De acordo com FENN et al (1975), a evapotranspiração depende do tipo de

solo e da vegetação, isto está intimamente relacionado aos fatores climáticos que afetam a capacidade de armazenamento de água no solo (precipitação, temperatura e umidade).

O processo somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol e da atmosfera, e será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga da superfície da Terra. Esta transferência ocorre fisicamente, nas formas de difusão molecular e turbulenta. Logo, o processo de evaporação/evapotranspiração de superfícies naturais, pode ser simulado com embasamento físico, por modelos que descrevem o efeito de resistência à difusão molecular e turbulenta sobre a distribuição de energia do sol ou da atmosfera (TUCCI, 1997).

Segundo PINTO et al (1976), o escoamento superficial é o componente do ciclo hidrológico no qual, preenchidas as depressões e ultrapassadas a capacidade de infiltração do solo, tem início o suprimento líquido que se caracteriza pelo escoamento superficial propriamente dito. Esse estudo considera o movimento da água a partir da menor porção de chuva que, caindo sobre um solo saturado de umidade ou impermeável, escoar pela sua superfície, formando sucessivamente as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação.

Na maioria dos casos, a precipitação será a principal fonte de umidade que contribui para a geração de líquidos percolados. As águas das chuvas são geralmente usadas para representar a quantidade total de água que atinge a superfície durante um certo período de tempo para uma dada localidade. Esta quantidade de chuva pode ser resultado de uma única tempestade ou de tempestades múltiplas (LU et al, 1985).

Como em todos os casos de infiltração, a situação mais crítica ocorre durante os períodos de chuva contínua, persistentes. Chuvas muito intensas, de curta duração, produzem uma saturação rápida da cobertura do aterro sanitário e diminui a infiltração, perdendo-se grande quantidade de água por

meio do escoamento superficial (PINEDA, 1998). A Tabela 2 apresenta as condições básicas para a utilização do balanço hídrico em aterros sanitários.

Tabela 2 – Condições Básicas para Utilização do Método do Balanço Hídrico

Nº.	Características
01	Cobertura com solo de 60 cm de espessura e inclinação entre 2 a 4 %.
02	Área de cobertura reservada para recobrimento com vegetação.
03	Infiltração no aterro proveniente somente da precipitação incidente.
04	Características dos resíduos urbanos e do material de cobertura uniforme.
05	Adição de umidade se dá somente depois do fechamento da trincheira.
06	A área da trincheira bem maior que sua profundidade.

Fonte: FENN et al., 1975.

Os parâmetros meteorológicos utilizados devem ser as médias aritméticas mensais do maior número de anos possível. Tais parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros Meteorológicos e Outros Dados Utilizados no Método do Balanço Hídrico

Parâmetro	Modo de Obtenção
Precipitação (P)	Boletins Pluviométricos
Evaporação potencial (EP)	Boletins Hidrometeorológicos (Tanque classe A)
Escoamento superficial (ES)	Aplicando-se o coeficiente de escoamento C' para cada tipo de solo e inclinação (ver Quadro 1). $ES = C'.P$
Infiltração (I)	Através da Expressão $I = P - ES$
I – EP	Diferença entre a água que infiltra e a que evapora.
Σ (NEG (I – EP))	É calculado somando-se os valores negativos de (I – EP)

Parâmetro	Modo de Obtenção
Armazenamento de água no solo de cobertura (AS)	Multiplicando-se o valor da água disponível para cada solo (ver Tabela 4) pela espessura desse solo, no caso em que $(I - EP) > 0$. Quando o solo estiver abaixo da capacidade de campo, $(I - EP) < 0$.
Varição no armazenamento de água no solo (ΔAS)	Diferença entre a água armazenada no solo, de um mês para o outro ($\Delta AS = AS_n - AS_{n-1}$)
Evaporação real (ER)	Quando $(I - EP) > 0$ então $ER = EP$ Quando $(I - EP) < 0$ então $ER = [EP + (I - EP) - \Delta AS]$
Percolação em mm (PER)	$PER = P - ES - AS - ER$
Vazão mensal em l/s (QM)	$QM = (PER \times \text{Área}_{\text{aterro}}) / 2.592.00$

Fonte: FENN et al., 1975.

Na Tabela 4, têm-se os valores do coeficiente de escoamento para as estações seca e úmida, levando-se em consideração o tipo de solo e declividade adotada.

Tabela 4 – Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial (C')

TIPO DE SOLO	DECLIVIDADE	COEFICIENTE C'	
		Estação Seca	Estação Úmida
ARENOSO	0 a 2 %	0,05	0,10
	2 a 7 %	0,10	0,15
ARGILOSO	0 a 2 %	0,18	0,17
	2 a 7 %	0,18	0,22

Fonte: FENN et al., 1975 apud CAPELO NETO et al, 2000.

2.8 Instalações Piloto para Simulação de Aterros Reais

O aterro sanitário tem sido um meio bastante popular para a disposição de resíduos urbanos e embora apresente certas vantagens, a formação de líquidos percolados pode causar séria poluição do meio ambiente. Nesse sentido, os efeitos dos líquidos percolados têm sido monitorados por muitos anos, seja em aterros em escala real ou em instalações piloto, avaliando as características dos líquidos percolados a partir de um resíduo contendo material aterrado similar de aproximadamente mesma idade e operar sob as mesmas condições operacionais do aterro em escala real (QUASIM e BURCHINAL, 1970).

O pesquisador KMET (1982), obteve excelentes resultados utilizando o método do balanço hídrico com modificações para contabilizar a infiltração e o escoamento superficial durante o período de inverno, para simular a produção em oito lisímetros de campo. Os fluxos de líquidos percolados variaram de 16,6 a 22,1% da precipitação anual.

KINMAN e WALSH (1980), também pesquisaram a formação de líquidos percolados de simuladores de aterros sanitários para resíduos urbanos e industriais. As células consistiam em tubos de aço com 1,83m de diâmetro, 3,66m de altura e 4,76mm de espessura. O principal objetivo do programa de pesquisa foi estudar a decomposição dos resíduos urbanos e a liberação de contaminantes dos vários tipos de aterros sanitários.

IPT/CEMPRE (2000), esclarece que em estudos realizados em simuladores de aterros sanitários, como lisímetros, podem-se monitorar parâmetros importantes de um balanço hídrico aplicado em aterros sanitários, como também verificar a formação de líquidos percolados. Nestas estruturas, fatores como a umidade inicial dos resíduos dispostos, a sua densidade e quantidade de água infiltrada podem ser monitoradas e seus resultados, comparados com dados obtidos em campo.

ACOSTA et al. (1998), monitoraram a evapotranspiração potencial em um lisímetro hidráulico, composto de três tanques cilíndricos de 57cm de diâmetro e 88cm de altura, preenchidos com solo e com vegetação de cobertura, tendo na sua parte inferior sensores em forma de aro, conectados cada a manômetros de água. A experiência em ambiente fechado demonstrou uma boa estabilidade do lisímetro, assim também como sua sensibilidade e fácil manejo. Os resultados obtidos demonstraram boa confiabilidade nas medições do aparato, encontrando-se uma relação de 0,71 para a relação entre os valores medidos no aparato e os encontrados num tanque Classe A.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa foram definidos os parâmetros envolvidos no balanço hídrico aplicado em aterros sanitários, como também o aparato experimental necessário para a realização dos estudos, fundamentados na literatura especializada de resíduos sólidos urbanos.

3.1 Estudo do Balanço Hídrico em Aterros Sanitários : Principais Parâmetros a Serem Monitorados

Vários fatores afetam a geração de líquidos percolados, o que torna necessário delimitar a área de estudo, escolhendo os parâmetros que são importantes para a pesquisa. A quantidade de parâmetros envolvidos em um balanço hídrico de uma instalação piloto de resíduos sólidos é muito grande.

Os resíduos podem assemelhar-se a um meio poroso como o solo, mas os processos físico-químicos envolvidos na decomposição do material, os tornam diferentes. As variáveis climáticas certamente contribuem para dificultar o problema. Os pesquisadores COSSU e CANZIANI (1985) ao comentarem as comparações entre percolados medidos e calculados com modelação matemática, apontam que os erros situam-se entre 100 e 1500%. Após criteriosa análise, foram selecionados os seguintes parâmetros como relevantes para a pesquisa:

3.1.1 Precipitação

Este é o componente mais importante do balanço. Para TUCCI (1997), as grandezas que caracterizam uma chuva são:

- **Altura pluviométrica (h):** É a espessura média da lâmina de água que recobriria uma região atingida pela precipitação, admitindo-se que essa água não se infiltrasse, não se evaporasse e nem escoasse para fora dos limites dessa região e é dada em mm;
- **Duração (t):** é o período de tempo durante o qual a chuva cai e suas unidades normalmente utilizadas são o minuto ou a hora;
- **Intensidade (i):** é a precipitação por unidade de tempo (mm/h ou mm/min). A intensidade de uma precipitação apresenta variabilidade temporal, mas, para análise dos processos hidrológicos, geralmente são definidos intervalos de tempo nos quais é considerada constante;
- **Freqüência de Probabilidade e Tempo de Recorrência:** A precipitação é um fenômeno do tipo aleatório. Na análise de alturas pluviométricas ou intensidades máximas, o T_r é interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação seja igualada ou superada. O seu inverso é a probabilidade de um fenômeno igual ou superior ao analisado, se apresentar em um ano qualquer (probabilidade anual).

Uma chuva pode ser aplicada à instalação piloto de duas maneiras: chuva artificial de laboratório ou natural. GEE (1976), ao medir infiltrações em solos, utilizou-se de uma tubulação pressurizada com tanque pneumático, devidamente protegido das condições climáticas.

As chuvas variam tanto com a localização geográfica como quanto com as estações do ano e isso é bem documentado na maioria da literatura hidrológica. Efeitos regionais como a latitude, montanhas, grandes lagos e oceanos também influenciam os padrões de chuva (LU et al, 1985).

Para MEDEIROS (2001), a chuva artificial tem duas vantagens principais:

- pode-se programar e controlar totalmente o experimento não dependendo das condições atmosféricas e,
- pode-se determinar o “hietograma de projeto” (padrão de chuva aplicada) como sendo reprodução de acontecimentos passados, uma composição de vários outros eventos ou com geração de uma série estocástica de chuvas.

Já a precipitação natural apresenta as seguintes vantagens:

- esse procedimento evita a determinação de um “hietograma de projeto” e toda a crítica que esse possa receber, dessa forma, uma série histórica é registrada e tendo seu valor de pesquisa, inquestionável;
- é muito mais econômico, por não necessitar de aspersores pressurizados e cuidadosamente aferidos e,
- a evaporação será sempre a real daquele ambiente, pois não haverá telhado.

Ponderando-se cuidadosamente os aspectos acima, determinou-se que a precipitação será a série histórica natural (precipitação de um dia medida em pluviômetro) que ocorrerá enquanto os ensaios forem realizados. As águas das chuvas são geralmente usadas para representar a quantidade total de água que atinge a superfície durante um certo período de tempo para uma dada localidade.

Como o objetivo em questão é reproduzir em escala laboratorial o comportamento de um aterro sanitário, todas as células estão expostas aos eventos naturais, o que significa que pode ser observado o comportamento destas diante das variações climáticas e daí poder comparar com um aterro em escala real.

3.1.2 Escoamento Superficial

FENN et al (1975) esclarecem que uma fração da precipitação incidente sofrerá um deslocamento pelo aterro sanitário e poderá ser perdida sem que esta tenha a chance de infiltrar. A quantidade de água que se desloca sobre o aterro dependerá de muitos fatores como, por exemplo, a intensidade e duração da chuva, a condição antecedente de umidade do solo, a permeabilidade e capacidade de infiltração da cobertura de solo, os declives, e a quantidade e tipo de cobertura vegetal, quando houver.

Para a observação deste parâmetro, segundo MEDEIROS (2001), foram instaladas em cada uma das células, caixas sifonadas de PVC, com 15 cm de diâmetro, diretamente no solo de cobertura e uma mangueira de plástico flexível de 2,5 cm de diâmetro interno, ligando-a a um reservatório metálico de 200 litros de capacidade.

3.1.3 Infiltração

Para GEE (1981), a infiltração é a passagem de água através da superfície do solo para dentro dele e está intimamente relacionada com a percolação, e pode ser afetada pelos seguintes fatores:

- Porosidade = f (densidade, tamanho e forma dos grãos e conteúdo orgânico) e está relacionada à permeabilidade;
- Conteúdo inicial de umidade;
- Inclinação e grau de deformação da superfície;
- Tamanho das gotas da chuva e velocidade de impacto;
- Intensidade de chuva e duração;
- Vegetação e, temperatura.

Esse parâmetro é calculado levando-se em consideração a precipitação, o escoamento superficial e a evaporação, através da equação:

$$I = P - Esc - E$$

Sendo:

I = infiltração calculada

P = precipitação real diária (medida)

E = evaporação real diária (medida)

Esc = escoamento superficial (medido)

3.1.4 Evaporação

TUCCI (1997), adverte que informações confiáveis sobre evapotranspiração real são escassas e de difícil obtenção, pois demandam um longo tempo de observação e custam caro. Não há procedimento seguro e relativamente barato para se determinar tanto a evapotranspiração real de culturas agrícolas como a evaporação de solo nu.

As possibilidades para a determinação da evaporação são:

- Dados de um tanque “classe A” de uma estação meteorológica mais próxima. A partir daí, tentar aplicar coeficientes para se avaliar a evaporação de solo nu.
- Aplicação de fórmulas empíricas para solo sem vegetação como a de TURC (1954);
- Adaptação do método de THORNTHWAITTE (1955) originalmente criado para bacias vegetadas;
- Uso de um lisímetro de pesagem e,

- Construção e operação de um lisímetro operando sempre saturado para que a infiltração seja sempre igual à percolação.

Nenhum dos três primeiros métodos acima é confiável e leva certamente a erros de difícil avaliação. O quarto método é o mais exato e também o mais caro. O quinto método considera que o lixo está sempre saturado, o que não é verdade.

Segundo HAMADA e ABECHÉ (2000), a quantidade de umidade disponível para a evaporação em um aterro sanitário é afetada pelo tipo de solo de cobertura e da respectiva vegetação existente. A evaporação em um determinado local ou é calculada ou é medida. Muitos autores propuseram métodos que permitissem estimar a evaporação utilizando sistemas medidores de evaporação.

Nesse sentido, desenvolveu-se um método bastante preciso (e barato) que atende perfeitamente o caso presente. Tal método tem ainda boa justificativa física e matemática.

A versão da equação básica do balanço hídrico utilizada é:

$$(U_{si} + U_{ri}) + (P - E_r - E_{sc}) - Perc = (U_{s_{i+1}} + U_{r_{i+1}}) \quad (1)$$

Onde:

$$(P - E_r - E_{sc}) = I \quad (2)$$

Sendo:

U_{si} = teor de umidade da camada de solo da cobertura (volume/área = mm);

U_{ri} = idem, dos resíduos (volume/área = mm);

P = Precipitação (mm);

E_r = Evaporação real (mm);

Esc = Escoamento superficial (volume/área = mm);

I = Infiltração (mm);

Perc = Percolação profundo do chorume (volume/área = mm);

i = Passo de cálculo para o tempo (1 dia ou 1 semana)

MEDEIROS (2001) desenvolveu então um pequeno piloto para a medida de evaporação real de solo nu, seguindo-se os mesmos parâmetros adotados para as células maiores.

Como se observa na Figura 09, este é um cilindro de PVC com diâmetro interno de 19,49 cm e altura de 70 cm, contendo uma camada de 0,30 m de material de cobertura, igualmente usado nas células maiores. Este material de cobertura é colocado sobre uma camada de 0,30 m de lixo, representando a média das células e equipado com um sistema de drenagem de líquidos percolados, que é composto por uma placa de PVC perfurada, permitindo assim a sua passagem até um reservatório inferior.



Fonte: Péricles A. Medeiros (2001)

Figura 9 – Piloto de Estudo da Evaporação

3.1.5 Volume de Líquidos Percolados

No fundo de cada célula existe um sistema de drenagem para líquidos percolados, composto de uma camada de brita n.º 2, e tubulação de PVC de diâmetro interno de 50 mm e declividade igual a 4%. Neste tubo foram feitos cortes transversais atingindo sua metade, com largura de 8 mm espaçados a cada 2 cm. Este sistema está conectado a reservatórios plásticos com capacidade de 40 litros.

3.1.6 Recalque

Nos projetos, este parâmetro é tratado de forma análoga a uma movimentação de terra normal, ou seja, os resíduos gerados são considerados como um tipo de “solo”. Estes, são compostos em sua grande maioria de material facilmente degradável biologicamente e submetidos a um processo de degradação, sofrem transformações importantes de matéria.

Este processo causa redução da massa de resíduos, resultando em espaços vazios que em um próximo momento serão ocupados por outros materiais, conseqüentemente variando a geometria das células de lixo. (GOMES et al, 1997).

Os processos que provocam estes recalques em aterros sanitários podem ser subdivididos em três tipos, segundo DECKA (1995) : a compactação dos resíduos, durante a operação / construção das células; os processos físicos, e os processos biológicos, que ocorrem durante todas as fases de degradação dos resíduos.

No piloto, uma referência (marca) previamente definida nas células até o material de cobertura de superfície, serve de ponto de referência para a medição semanal deste parâmetro.

3.1.7 Temperatura

No aparato experimental implantou-se um sistema de monitoramento da temperatura da massa de resíduos aterrada, que é constituído por um tubo de PVC marrom, com 75mm de diâmetro e 2m de comprimento, perfurado em sua extremidade que está em contato com a massa de resíduos urbanos.

3.2 Projeto e Construção do Aparato Experimental : Células Piloto de Campo Simulando um Aterro Sanitário

O projeto e a construção do aparato experimental foi conduzido por MEDEIROS (2001) e neste, considerou-se que quanto maior a área em planta, mais representativa seria a instalação experimental. Um dos problemas que surgiu durante tais considerações foi o crescimento do custo. Considerando-se um sólido com tamanho máximo 0,30 m e que este não deva exceder a 25 % da menor dimensão da secção transversal, a dimensão mínima será de 1,20 m.

Considerando-se a área disponível e a otimização dos trabalhos e recursos financeiros optou-se, após estudo bibliográfico sobre instalações experimentais simulando aterros reais, pela construção de células de aterro sanitário em escala piloto no campus da UFSC.

Foram construídas três células similares, com a finalidade de possibilitar a comparação de dados, ou seja, uma instalação piloto com medições triplicadas dos mesmos parâmetros.

No caso da forma quadrada e retangular, um maior cuidado teve de ser tomado também junto aos vértices internos. Nesses pontos haveria tendência de formação de caminhos preferenciais. Para evitar o problema, esses locais serão preenchidos com resíduos de menor granulometria e cuidadosamente compactados.

Por causa das más condições de estabilidade do terreno em épocas chuvosas, vigas de concreto servem de fundação com apoio sobre o solo. A dimensão interna em planta da cada célula é de 1,54 x 1,57m e a altura total interna é de 2,56m incluindo uma folga de 0,11m, sendo que as paredes entre as mesmas têm largura de 0,20m.

A altura total externa incluindo viga baldrame é de 3,00m. As Figuras 10 e 11 apresentam uma vista esquemática das três células e a configuração das mesmas:

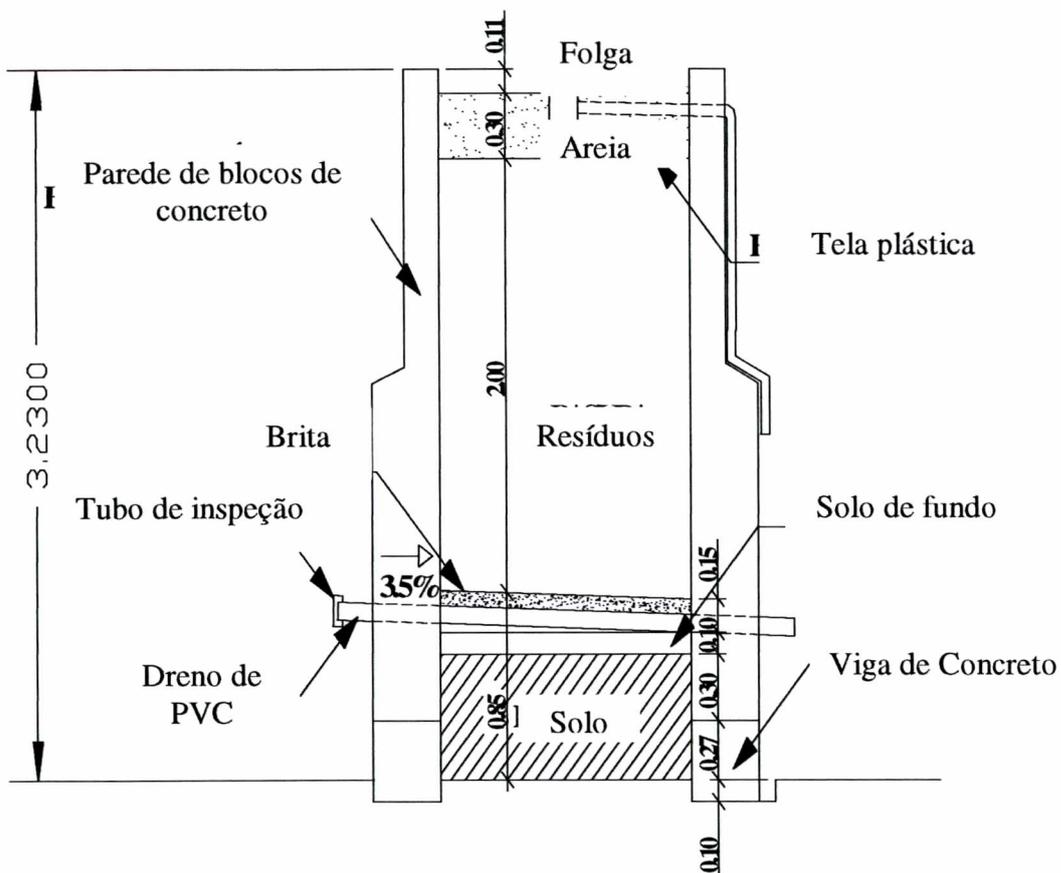


Figura 10 – Vista Esquemática das Células (medidas em metros, em escala, somente ilustração). Adaptado de MEDEIROS (2001).

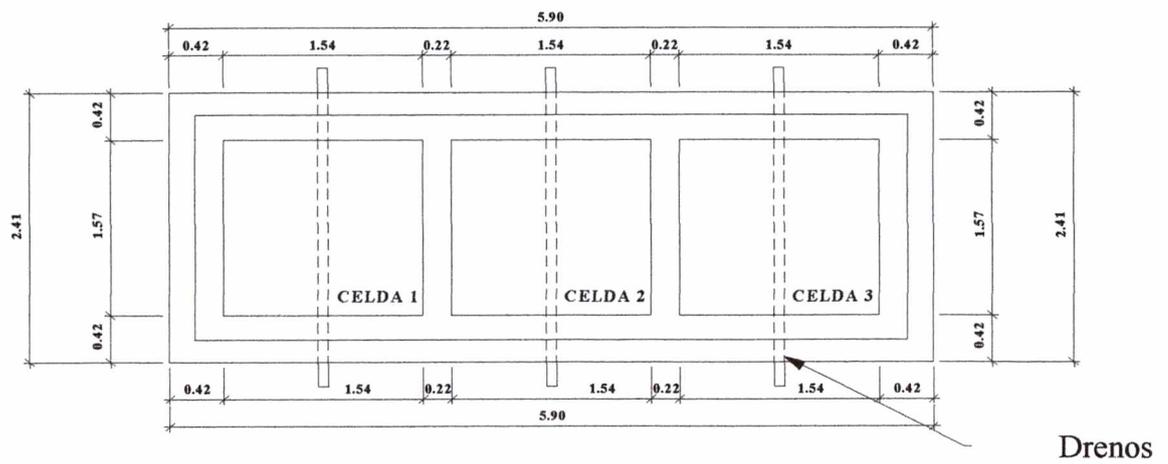
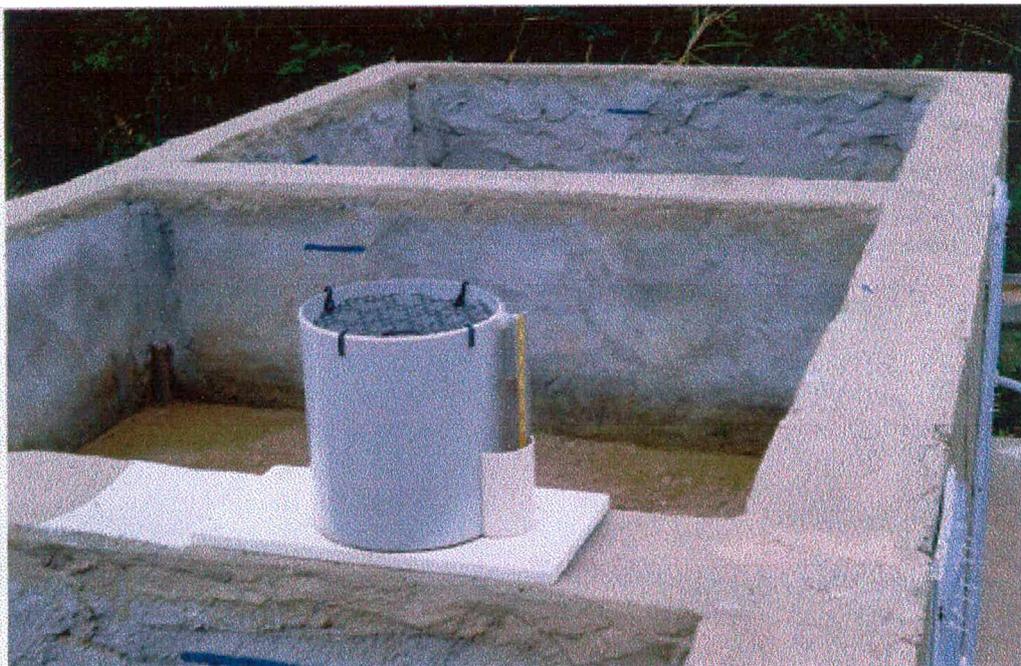


Figura 11 – Configuração das células (medidas em metros, em escala, somente ilustração). Adaptado de MEDEIROS (2001).



Fonte: Péricles A. Medeiros (2001)

Figura 12 – Vista Superior das Células



Fonte: Péricles A. Medeiros (2001)

Figura 13 – Vista das Células

3.3 Definição do Substrato (Resíduos Urbanos) e do Material de Cobertura (Solo) para o Estudo

Dois parâmetros foram fundamentais para determinação da amostra de resíduos a serem estudados :

- considerações dos pesquisadores BENGTTSSON et al (1994), onde se observa que a qualidade do lixiviado depende da composição inicial dos resíduos aterrados e;
- a dissertação está inserida num projeto de pesquisa na área de aterros sanitários para municípios de pequeno porte e, portanto, a escolha de um roteiro de coleta que não fugisse da realidade apresentada nestes municípios foi primordial para que este parâmetro fosse definido.

Como a coleta regular da cidade está dividida em roteiros, e estes contam com dias, horários e abrangências distintos, nesta fase contou-se com apoio da COMCAP – Companhia Melhoramentos da Capital, responsável pela coleta de resíduos da cidade de Florianópolis, a qual forneceu dados importantes para a pesquisa de definição de um roteiro representativo. Em função dos condicionantes acima especificados, escolheu-se o roteiro denominado de K8V, o qual abrange os bairros de Capoeiras e Vila São João, em Florianópolis.

Por outro lado, a fim de simular um aterro sanitário em escala real, estudou-se um material de cobertura para os resíduos depositados no aparato experimental. De acordo com FENN et al (1975), a fração da precipitação que infiltra num aterro sanitário é a principal fonte de contribuição de umidade para a geração de líquidos percolados a partir de um aterro sanitário. Nesse sentido, condições de superfície do aterro sanitário e também das características climatológicas da região onde este se encontra, influenciarão em muito a infiltração pela cobertura de solo e qualquer subsequente percolação abaixo em direção aos resíduos sólidos, o que é corroborado por LU et al (1985).

Tendo isso em mente, os pesquisadores ORTH e TAKEDA (1988), esclarecem que as células de aterros sanitários devem ter uma cobertura mínima com material impermeabilizante para dificultar a infiltração de água, com alturas variando de 0,15 a 0,30m.

Nesta pesquisa, o material de cobertura escolhido foi uma areia grossa da região com uma altura de 0,30m ver MEDEIROS (2001). A escolha deste solo de cobertura objetiva a simplificação da medida do parâmetro escoamento superficial, num primeiro momento dos trabalhos de pesquisa.

3.4 Operação do Aparato Experimental : Preenchimento com Resíduos, com Material de Cobertura e Monitoramento do Sistema

3.4.1 Principais Características do Substrato (Resíduos Urbanos) e do Material (Solo) de Cobertura

Os resíduos sólidos coletados, provenientes da coleta regular, especificamente do Roteiro, foram transferidos para uma área previamente preparada para o seu recebimento e caracterização. O caminhão descarregou os resíduos em um monte único, e as atividades seguiram duas frentes de trabalho ou etapas: enchimento das células e determinação da composição gravimétrica dos resíduos usados no piloto.

Para o enchimento das células foram usados tonéis de 200 litros de capacidade, que depois de pesados numa balança do tipo plataforma e cheios de resíduos, eram despejados na caçamba de um trator retro-escavadeira, que auxiliava durante o enchimento das células. O adensamento manual foi feito a cada 0,50m de altura de resíduos dispostos com a ajuda de adensadores improvisados no local. Quando o volume previsto para cada célula foi atingido, ou seja $4,836 \text{ m}^3$, a massa de resíduos foi coberta com telas plásticas com diâmetros inferiores a 0,10 cm e recobertas com uma camada de 30 cm de material de cobertura.

Após a disposição dos resíduos nas células e sua posterior compactação manual, o peso específico em cada uma das células foi de: $325,21 \text{ kg/m}^3$ na Célula 01; $298,29 \text{ kg/m}^3$ na Célula 02 e $343,93 \text{ kg/m}^3$ na Célula 03.

Na etapa de caracterização dos resíduos, as amostras foram retiradas de cinco pontos distintos (topo e quatro laterais) e transferidos para tonéis de 200 litros cada, momento em que os sacos foram rompidos para o preenchimento dos tonéis. O objetivo da amostragem segundo o IPT/CEMPRE

(2000) é a obtenção de uma amostra representativa, ou seja, a coleta de uma parcela do resíduo a ser estudado que, quando analisada, apresente as mesmas características e propriedades de sua massa total.

Após isso, os tonéis foram despejados num pátio calçado, iniciando-se o processo de mistura e quarteamento, processo este em que uma amostra bruta é dividida em quatro partes iguais (quartis), sendo tomados dois quartis opostos entre si para consistir uma nova amostra, descartando-se os dois restantes. As partes não-descartadas são novamente misturadas e o processo é repetido até que se obtenha o volume final desejado, tomando-se o cuidado de selecionar os quartis em posição oposta aos tomados anteriormente.

O teor de umidade e o teor de material seco da amostra foram obtidos pela análise da amostra representativa e os ensaios foram realizados no Laboratório de Integrado de Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. No que se refere ao material usado como solo de cobertura das células, estes foram analisados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, seguindo-se os procedimentos preconizados pela NBR 7229 (1993) – Análise Granulométrica de Solos.

3.4.2 Precipitação

Próximo à instalação piloto foi instalado um pluviômetro, projetado por MEDEIROS (2001), que consiste em um tanque plástico de diâmetro interno superior de 21,4cm e 25cm de altura, com dreno inferior que conduz , a precipitação ocorrida diariamente através de uma mangueira plástica até um pequeno reservatório com capacidade para 5 litros. Todas as medições de precipitação efetuadas neste dispositivo foram posteriormente confrontadas com as medições realizadas pela EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agrícola de Santa Catarina, e nesta comparação, apresentou uma pequena diferença de apenas 1,85%, o que evidencia que o pluviômetro é confiável e adequado para o prosseguimento da pesquisa.

3.4.3 Escoamento Superficial

Nesta situação atípica de trabalho, onde todo o volume de água precipitado sobre as células infiltra pelo material de cobertura e pela configuração das células, o monitoramento deste parâmetro é realizado diariamente, apesar da probabilidade remota do escoamento superficial ocorrer.

3.4.4 Infiltração

Uma amostra do solo de cobertura das células foi retirada e submetida ao ensaio de infiltração conforme preconizado em normas vigentes.

3.4.4 Evaporação

Através de pesagens sucessivas do piloto de evaporação contendo resíduos sólidos e de dados meteorológicos obtidos junto à Epagri/SC, o parâmetro evaporação é determinado, levando-se em consideração a precipitação ocorrida diariamente. Para auxiliar a determinação da evaporação, um pequeno evaporímetro de tanque, desenvolvido por MEDEIROS (2001), está instalado junto às células, sujeito às precipitações, vento e radiação solar. Este evaporímetro está equipado com uma escala graduada em centímetros, onde se pode notar a variação do volume de água em seu interior.

3.4.5 Volume de Líquidos Percolados

Diariamente, estes são coletados dos tanques inferiores que estão conectados ao sistema de drenagem de líquidos percolados presente em cada uma das células. O seu volume é anotado em uma planilha específica, observando-se sua coloração.

3.4.6 Recalque

Com auxílio de uma trena, a partir do ponto de referência em cada uma das células, este parâmetro é determinado semanalmente.

3.4.7 Temperatura

É determinada ao inserir um termômetro no sistema de leitura da temperatura em cada uma das células.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados a seguir os principais resultados experimentais relativos ao monitoramento do piloto de campo. Na seqüência, serão realizadas as discussões sobre os parâmetros monitorados.

4.1 Características dos Resíduos Urbanos e do Material de Cobertura Utilizados na Instalação Piloto

4.1.1 Amostra de Resíduos

Antes de se realizar o preenchimento das células, uma caracterização prévia dos resíduos foi efetuada, baseando-se nos procedimentos recomendados para a determinação da composição gravimétrica de resíduos e umidade. Apresenta-se na Tabela 5 estes resultados.

Tabela 5 – Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos das Células

COMPONENTE	PESO (kg)	PERCENTUAL TOTAL (%)
Resíduo Orgânico	34,45	57,56
Papel	4,10	6,85
Papelão	1,85	3,09
Plástico	7,40	12,36
Vidro	0,70	1,17
Multicamada	0,70	1,17
Alumínio	0,30	0,50
Ferro	0,40	0,67
Outros Metais	0,00	0,00
Madeira	1,20	2,01
Têxteis e couro	2,80	4,68
Tóxicos	0,05	0,08
Infectante	0,00	0,00
Resíduos sanitários	5,20	8,69
Inertes	0,30	0,50
Borracha	0,00	0,00
Tecnológico	0,00	0,00
Outros	0,40	0,67
Total	59,85	100,00

Do exposto na página anterior, pode-se verificar que um grande percentual de matéria orgânica está presente nos amostra de resíduos sólidos utilizada, igual a 57,56% da massa total. O componente Papel representa 6,85% e o componente Papelão 3,09% da massa de resíduos urbanos e que 12,36% são do componente Plástico, sendo que 9,94% destes são do tipo Plástico Mole e 2,42% são do tipo Plástico Duro.

Na amostra em que foi determinada a composição, observa-se que o componente Vidro representa 1,17% da massa de resíduos, os metais representam 1,17%, sendo que destes 0,50% é de Alumínio e 0,67% de Ferro; a Madeira representa 2,01% da massa total de resíduos amostrados; os Têxteis e Couros perfazem um total de 4,68% em peso.

Por outro lado, os resíduos tóxicos (pilhas e lâmpadas) apresentaram um percentual de 0,08%, enquanto que os resíduos sanitários tiveram percentual considerável de 8,69%. Da massa total de resíduos, 0,50% era de Inertes e 0,67% de Rejeitos e os componentes Outros Metais, Borracha e Tecnológico não foram encontrados na amostra de resíduos analisada.

A COMCAP juntamente com o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, vem desenvolvendo uma pesquisa de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares de Florianópolis e algumas das informações do roteiro escolhido (K8V), foram levantadas e são apresentadas no Tabela 06.

Nesta pesquisa realizada pela COMCAP, pode-se verificar que o Roteiro K8V, que compreende os bairros Capoeiras e Vila São João, manteve um perfil uniforme durante os meses amostrados, apresentando poucas variações nos percentuais dos componentes.

Tabela 6 – Composição Gravimétrica do Roteiro K8V

COMPONENTES ^(*)	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO
Resíduo Orgânico	54,72	53,27	61,90	55,21	47,76	53,42
Papel	10,67	11,70	7,36	11,97	15,70	16,50
Papelão	0,53	1,45	0,50	0,75	2,54	1,11
Plástico	13,33	14,36	10,81	10,14	14,33	10,66
Vidro	7,75	1,90	1,90	0,62	1,49	0,83
Multicamada	1,15	1,42	0,50	0,66	1,64	0,85
Alumínio	0,94	0,05	0,76	0,38	0,05	0,63
Ferro	2,28	1,21	0,50	1,32	1,19	0,91
Outros metais	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10
Madeira	0,22	0,69	0,00	0,00	0,77	0,75
Têxteis e couro	3,12	1,47	4,92	10,40	2,11	4,00
Tóxicos	0,14	0,00	0,00	0,35	0,20	0,26
Infectante	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resíduos sanitários	19,27	11,60	8,95	7,51	6,47	8,03
Inertes	2,57	0,00	1,55	0,50	0,20	1,42
Borracha	0,48	0,00	0,10	0,15	3,41	0,16
Tecnológico	0,00	0,00	0,14	0,00	0,12	0,00
Outros	0,19	0,88	0,12	0,05	1,97	0,38

^(*) Análise quantitativa – Percentual em peso. Fonte: Dados parciais da Pesquisa de Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Florianópolis – COMCAP/2001

A partir da observação anterior, pode-se verificar que o componente resíduo orgânico oscilou entre 47,7 e 61,9%, apresentando uma média de 54,38% durante os seis meses. O componente Papel variou de 7,36% a 16,50%, sendo que a menor valor encontrado foi detectado no mês de Julho. O papelão tem aparecido em poucas quantidades e apresentou um pico de 2,54% em Setembro, mantendo uma média de 1,14% durante os meses amostrados;

O mês de junho foi aquele em que o componente Plástico apresentou um pico de 14,36%, mantendo uma média de 12,27% nos seis meses. Em Maio o componente Vidro representou 7,75% da amostra analisada, apresentando baixas significativas nos meses seguintes, e o componente Metal teve o seu pico no mês de Maio, quando representou 3,22 da amostra total.

Da classificação realizada durante o preenchimento das células e da pesquisa de caracterização feita pela COMCAP, percebe-se semelhanças com poucas variações significativas em alguns componentes como, por exemplo, os Resíduos Orgânicos. Segundo o IPT/CEMPRE (2000), um dos parâmetros mais importantes na formação dos líquidos percolados é o teor de umidade, que expressa a quantidade de água contida na massa de resíduos.

Esta água tenderá a solubilizar substâncias presentes nos resíduos sólidos, principalmente aqueles de composição orgânica, dando origem a uma mistura líquida complexa com composição química bastante variável. Esta variabilidade pode ser tanto qualitativa quanto quantitativa. Neste sentido, parte da amostra de resíduos foi submetida a uma temperatura de 103°C, até que o peso constante fosse determinado. Neste trabalho, a umidade e o material seco foram determinados com as seguintes equações:

$$\text{Umidade (\%)} = [(A - B)/A] \times 100$$

$$\text{Material Seco (\%)} = (B/A) \times 100$$

Sendo que: A = peso da amostra antes da secagem: 170,6 g

B = peso da amostra após a secagem: 76,45 g

Tem-se, portanto, um teor de umidade inicial da massa de resíduos aterrada igual a 55,2%. De acordo com FUNGAROLI e STEINER (1979), a produção inicial de líquidos percolados em um aterro sanitário não ocorre imediatamente após a disposição do resíduo e que a sua geração é dependente da umidade inicial dos resíduos urbanos dispostos: quanto menor

o teor de umidade inicial, maior o tempo para o início de produção significativa de líquidos percolados.

Na pesquisa de caracterização dos resíduos sólidos realizada pela COMCAP nos meses de Maio até Outubro, o roteiro escolhido apresentou os seguintes valores de peso específico, densidade aparente e umidade, que são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise Qualitativa do Roteiro K8V

ROTEIRO K8V	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
Peso Específico (kg/m ³)	104	105	121	166	101	126
Densidade Aparente (kg/m ³)	256	273	182	160	195	---
Umidade (%)	---	57	49	56	63	51

Fonte: Dados parciais da Pesquisa de Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Florianópolis COMCAP/2001

A análise do quadro apresentado acima mostra que a componente Umidade dos resíduos sólidos no roteiro escolhido variou de 49 a 63% (média igual a 55,0 %), mostrando o potencial de geração de líquidos percolados. Por outro lado, a densidade do aterro, de acordo com a literatura, é também um condicionante na formação de líquidos percolados, pois quanto maior a densidade do aterro, maior será o tempo para o início de produção de líquidos percolados. A densidade apresentada é baixa, e os valores estiveram entre 160 e 256 kg/m³.

LIMA (1995), esclarece que para aterros pouco compactados, com resíduos aterrados apresentando peso específico entre de 0,4 a 0,7 ton/m³, 25 a 50% da precipitação média anual que incide sobre a área do são

potencialmente transformadas em líquidos percolados; enquanto que, para os fortemente compactados, com peso específico maior que $0,7 \text{ ton/m}^3$, espera-se que da precipitação média anual, 15 a 25% se transforme em percolados.

Após a disposição dos resíduos nas células e sua posterior compactação manual, o peso específico em cada uma das células foi de: $325,21 \text{ kg/m}^3$ na Célula 01; $298,29 \text{ kg/m}^3$ na Célula 02 e $343,93 \text{ kg/m}^3$ na Célula 03. Nota-se que os valores situam-se abaixo dos de aterros sanitários fracamente compactados, e isso devido às configurações das células e a dificuldade de compactação durante o seu enchimento.

Por outro lado, estes valores correspondem aos aterros em valas ou trincheiras, característicos de pequenos municípios, onde a compactação é igualmente realizada de forma manual, sem o auxílio de veículos motores (tratores, compactadores, etc ...). O volume total de água disponível em uma só célula (sem sólidos nem matéria orgânica), em um determinado dia, será então considerado como incógnita e calculado pelas expressões do balanço hídrico a seguir (MEDEIROS , 2001):

$$U_{t(i)} = U_{t(i-1)} + P_i \cdot A - ESC_i - k_1 (E_i \cdot A) - PERC_i \cdot k_2 \quad (1)$$

$$U_t = U_r + U_s \quad (2)$$

$$INF_i = P_i \cdot A - ESC_i \quad (3)$$

$$U_{t_0} = H_{r_0} \cdot (\gamma_{r_0} \cdot V_{r_0}) + H_{s_0} \cdot (\gamma_{s_0} \cdot V_{s_0}) \quad (4)$$

$$H_{r_0} = (W_{r_{ho}} - W_{r_{so}}) / W_{r_{ho}} \quad (5)$$

$$H_{s_0} = (W_{s_{ho}} - W_{s_{so}}) / W_{s_{ho}} \quad (6)$$

Sendo:

- r: índice referente aos resíduos urbanos;
- s: índice referente ao solo de cobertura;
- $_i$: sub-índice referente ao intervalo de tempo igual a 1 dia;
- $_0$: sub-índice referente ao “tempo zero”, dia do enchimento das células com resíduos e solo de cobertura: 12 de maio de 2001;
- t: índice referente a “total” (lixo + solo de cobertura);
- $_h$: sub-índice referente a úmido;

- s : sub-índice referente a seco;
- $Ut_{(i)}$: umidade total, no tempo i em 1 célula, em litros;
- $Ut_{(i-1)}$: umidade total, no tempo anterior, em litros;
- P_i : precipitação no tempo i , em 1 célula, em dm;
- E_i : evaporação do solo de cobertura no tempo i , em 1 célula, em dm;
- ESC_i : escoamento superficial, no tempo i , em 1 célula, em litros;
- A : área em planta de 1 célula = 241,780 dm²;
- INF_i : infiltração no tempo i , em 1 célula, em litros;
- $PERC_i$: volume de líquido percolado, incluindo volume de material degradado, no tempo i , em 1 célula, em litros;
- k_2 : coeficiente menor que 1,00 que retira de $PERC_i$ todo o volume de material degradado;
- k_1 : coeficiente menor que 1,00 que retira de E_i todo o volume de gases arrastados junto com a evaporação;
- Ut_0 : volume total de água, no “tempo zero”, em 1 célula, em litros (equivalente ao peso em kgf);
- Hr_0 : teor de umidade do lixo, no “tempo zero”;
- γ_{s0} : peso específico aparente úmido (kgf/m³) de amostra de solo de cobertura, no “tempo zero”;
- γ_{r0} : peso específico aparente úmido (kgf/m³) do lixo, no “tempo zero”;
- Vr_0 : volume de lixo, no “tempo zero”, em 1 célula, em m³;
- Vs_0 : volume do solo de cobertura, no “tempo zero”, em m³.
- Wr_{ho} : peso úmido da amostra de resíduos, no “tempo zero”, em kgf.
- Wr_{so} : peso seco em estufa, de amostra de resíduos, no “tempo zero”, em kgf;
- Ws_{ho} : peso úmido de amostra de solo de cobertura, no “tempo zero”, em kgf.
- Ws_{so} : peso seco em estufa, de amostra de solo de cobertura, no “tempo zero”, em kgf.
- H : teor de umidade de uma amostra

Segundo MEDEIROS (2001), os coeficientes k_1 e k_2 descritos acima estarão muito provavelmente acima de 0,90 e inferiores a 1,00. Isso porque, os sólidos totais presentes nos líquidos percolados têm pesos específicos maior que o da água ocupando, portanto, pequeno volume. Por não serem objetivos centrais nesta pesquisa, k_1 e k_2 serão considerados preliminarmente iguais a 1.

Dessa forma, os valores reais de $U_{t(i)}$ da Equação (1) sempre estarão minorados em torno de 5 %. Isso porque, mesmo com a influência de k_1 e k_2 reais, a chuva é o fator de maior peso. De posse dos dados já citados, a umidade total (lixo + solo de cobertura) no “tempo zero” foi de:

- Célula 1: 914,58 litros;
- Célula 2: 842,72 litros,
- Célula 3: 964,55 litros.

4.1.2 Material de cobertura das células

A análise granulométrica do material utilizado na cobertura dos resíduos sólidos usados nas células fornece as seguintes informações, conforme expostas na Tabela 8. O teor de umidade inicial do material de cobertura foi de 4,75% e o seu peso específico aparente úmido igual a 1350 kg/m^3 .

Segundo as dimensões das partículas e em determinados limites, as frações constituintes dos solos recebem designações próprias. Essas frações, de acordo com a escala granulométrica brasileira, são: pedregulho – conjunto de partículas cujas dimensões estão compreendidas entre 76 e 4,8mm; areia, entre 4,8 e 0,05mm; silte, entre 0,05 e 0,005mm; argila, inferiores a 0,005mm (CAPUTO, 1973). A curva granulométrica que representa as dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, pode ser vista na Figura 16.

Desta curva, pode-se comentar que coeficiente de uniformidade C_u , razão entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10% igual a 4,27. Esta relação segundo CAPUTO (1973), indica, na realidade, “falta de uniformidade”, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material. Consideram-se de granulometria muito uniforme os solos com C_u menor que 5, o que representa o caso estudado. Pela porcentagem do material de cobertura que passou na peneira N^o. 200 este solo pode ser classificado como areia grossa.

Tabela 8 – Análise Granulométrica do Material de Cobertura

PENEIRAS		PORCENTAGEM QUE PASSA (%)
Número	Abertura (mm)	
¼"	6,4	99,9
4	4,8	99,68
8	2,4	93,82
10	2,0	88,42
16	1,19	70,32
30	0,59	38,3
40	0,42	28,89
50	0,3	17,41
70	0,21	8,93
100	0,15	4,67
200	0,074	0,0

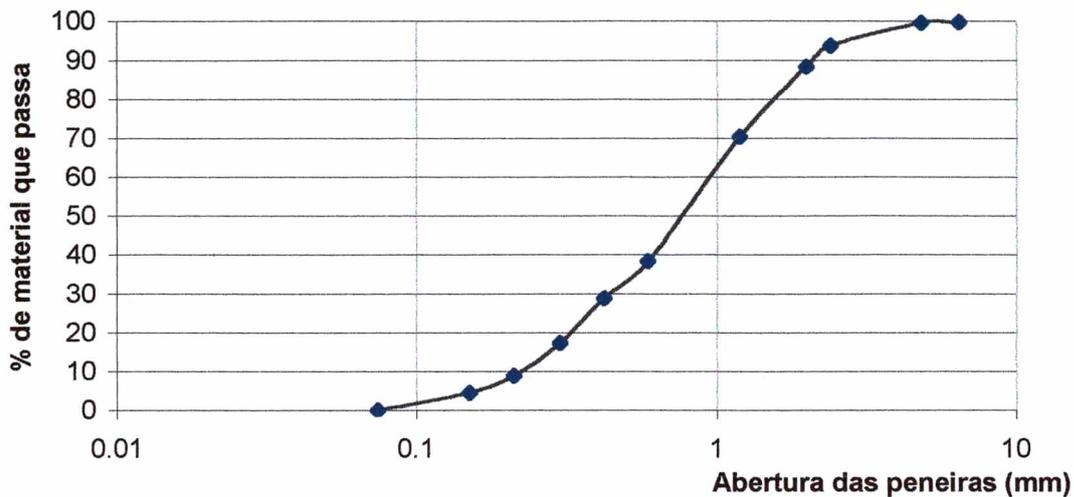


Figura 16 – Curva granulométrica do solo de cobertura

4.2 Resultados do Monitoramento dos Parâmetros do Balanço Hídrico e Outros na Instalação Experimental

4.2.1 Precipitação

Conhecer o regime das chuvas do local de implantação do aterro é condição primordial para se iniciar o cálculo do balanço hídrico. Precipitando sobre o solo, a água de chuva segue diferentes caminhos. Como a camada de cobertura é um meio poroso, há infiltração da água que inicialmente atinge o solo, até o momento que as suas camadas superiores se saturam, ou seja, não consigam mais admitir a entrada de água (IPT/CEMPRE, 2000).

A parcela de água que infiltrou no solo sofre uma ação de forças capilares e da gravidade, prosseguindo seu caminho para as camadas inferiores e atingindo a massa de resíduos aterrados, umedecendo-a de cima para baixo, modificando gradativamente o perfil de umidade no interior da célula.

Através de um ensaio de infiltração no material usado como solo de cobertura na instalação piloto concebida para o presente estudo, este revelou uma capacidade de infiltração de 680 mm/h.

Segundo NERILO (1999), a máxima intensidade de chuva já registrada no Estado de Santa Catarina ocorreu no município de Paulo Lopes, com 424,1 mm/h, para um período de retorno de 100 anos e duração de cinco minutos.

Assim, por tratar-se de uma situação atípica, a infiltração será arbitrada como sendo igual à precipitação ocorrida. As variações deste parâmetro e seus valores acumulados podem ser vistos nas Figura 17 e 18, bem como nas Tabelas 9 – 11, em anexo.

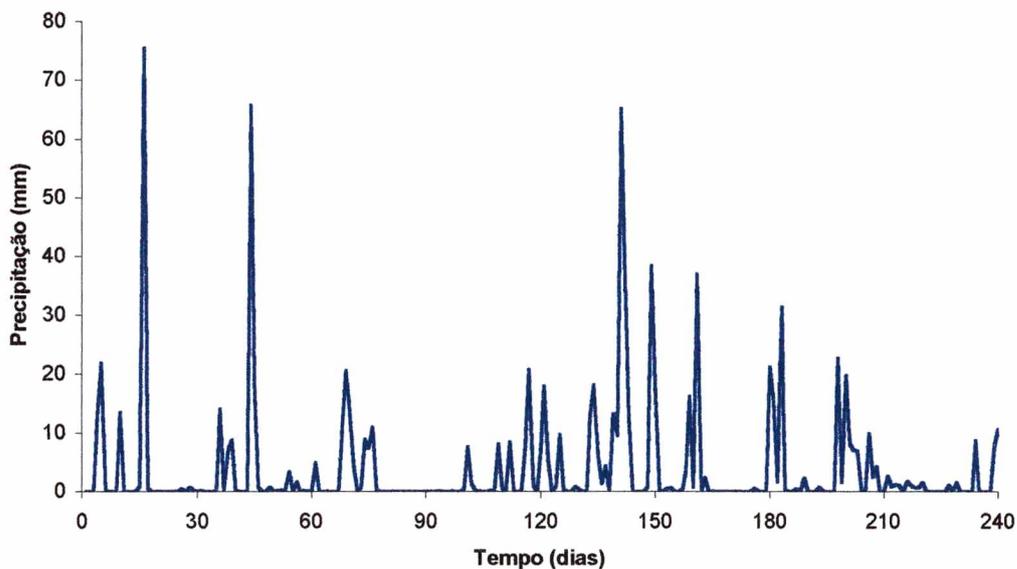


Figura 17 – Precipitação diária sobre as células

Dos valores da precipitação, pode-se comentar que durante o primeiro mês de monitoramento, a precipitação acumulada atingiu o valor de 126,636 mm de chuva, sendo que o dia de maior pico foi o 16º com 75,396 mm de chuva. No segundo mês, o valor acumulado da precipitação foi de 122,979 mm, apresentando um ligeiro decréscimo de 2,88% em seu valor, com pico de 65,734 mm de chuva no 45º dia. Enquanto que no terceiro mês apresentou um perfil de regime seco, havendo uma diminuição na precipitação incidente sobre

as células e uma incidência maior de radiação sob as mesmas. O valor acumulado neste período foi de 84,209 mm, uma queda de 31,53% em relação ao mês passado, e com pico de chuva no dia 20,530mm. O mês seguinte continua apresentando um regime mais seco e a precipitação acumulada no período foi de 64,132 mm, atingindo o máximo valor para o referido mês de 20,718 mm no dia 117.

O quinto mês de observações caracterizou-se como chuvoso, o qual apresentou o maior valor de precipitação acumulada nos meses de monitoramento, 272,767 mm. Entre o quarto e quinto meses, houve duas semanas ininterruptas de dias ensolarados, sem chuvas. No sexto mês, as chuvas diminuem e o valor acumulado da precipitação foi de 83,439 mm com máxima de 36,917 mm (dia 161) e 134,637 mm de chuva foram registrados no sétimo mês de monitoramento, com pico de 31,379 mm (dia 183).

O oitavo mês de observação registrou uma baixa no parâmetro Precipitação, e foram registrados 41,227 mm de chuva. Finalmente, o total acumulado do parâmetro Precipitação durante o período da pesquisa foi de 930,026 mm de chuva (Figura 18), sendo que o maior valor mensal registrado se deu no 5º mês e o menor no 8º mês. Do valor total acumulado, em termos de média em oito meses, esta seria de 116,253 mm/mês e se esta fosse diária, o seu valor seria de 3,875 mm/dia.

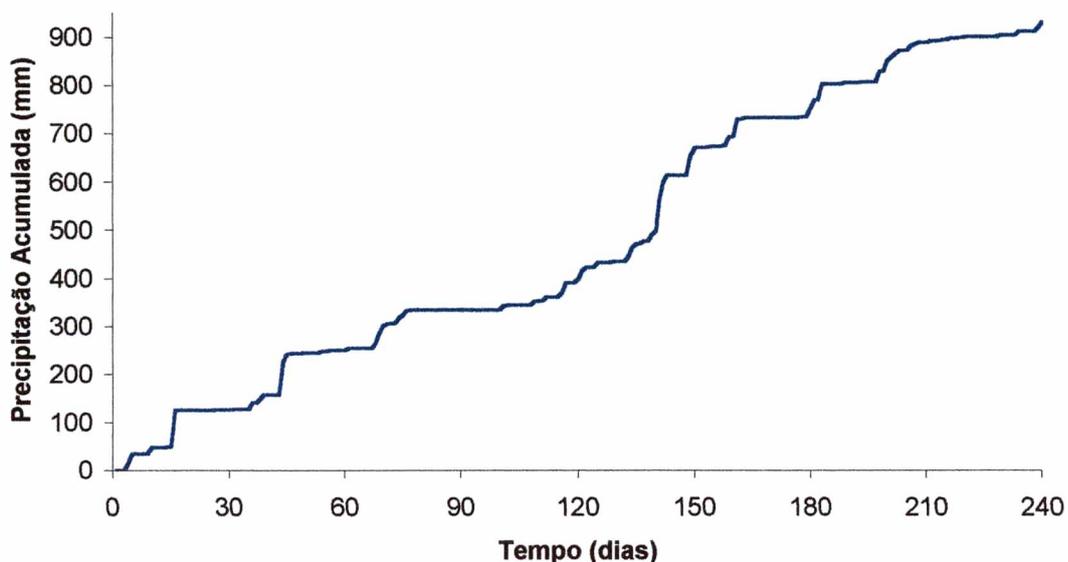


Figura 18 – Precipitação acumulada durante o período de monitoramento

Segundo MEDEIROS et. al (2002), a região de Florianópolis é de inverno seco e verão úmido. Este, com fortes pancadas de chuva nos finais de tarde. Os meses de abril até agosto apresentam chuvas na ordem de 80mm e nos demais meses do ano, esta pode variar de 130 até 250mm, o que pôde ser observado durante a pesquisa, que se estendeu de maio até janeiro, abrangendo o inverno e começo do verão.

4.2.2 Evaporação

Considerou-se durante a pesquisa que as alturas evaporadas no piloto para evaporação de solos nus sejam iguais às das três células maiores, que estão lado a lado. Desta forma, tem-se um único valor para este parâmetro, sendo válido igualmente para todas elas. A Figura 19 ilustra a variação diária deste parâmetro e a Figura 20 apresenta a evaporação acumulada.

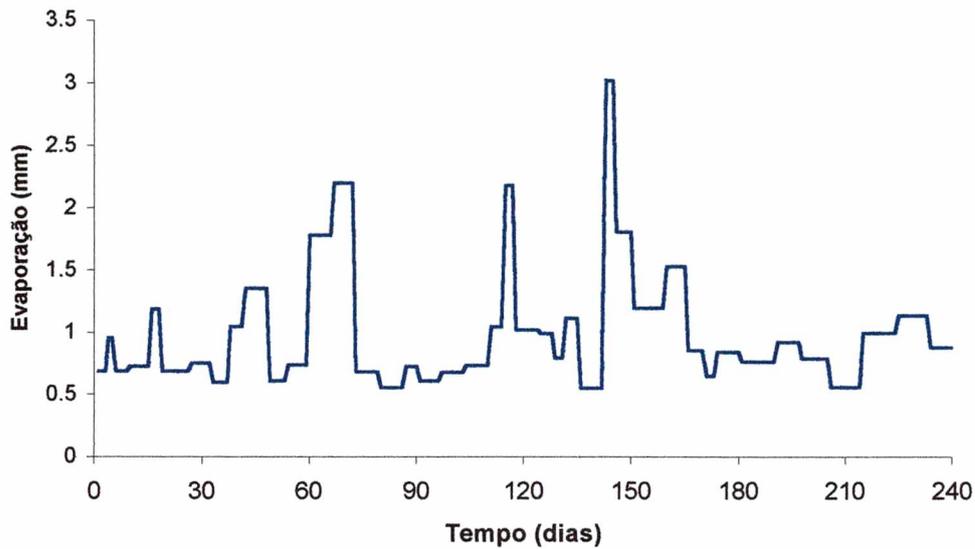


Figura 19 – Evaporação Diária.

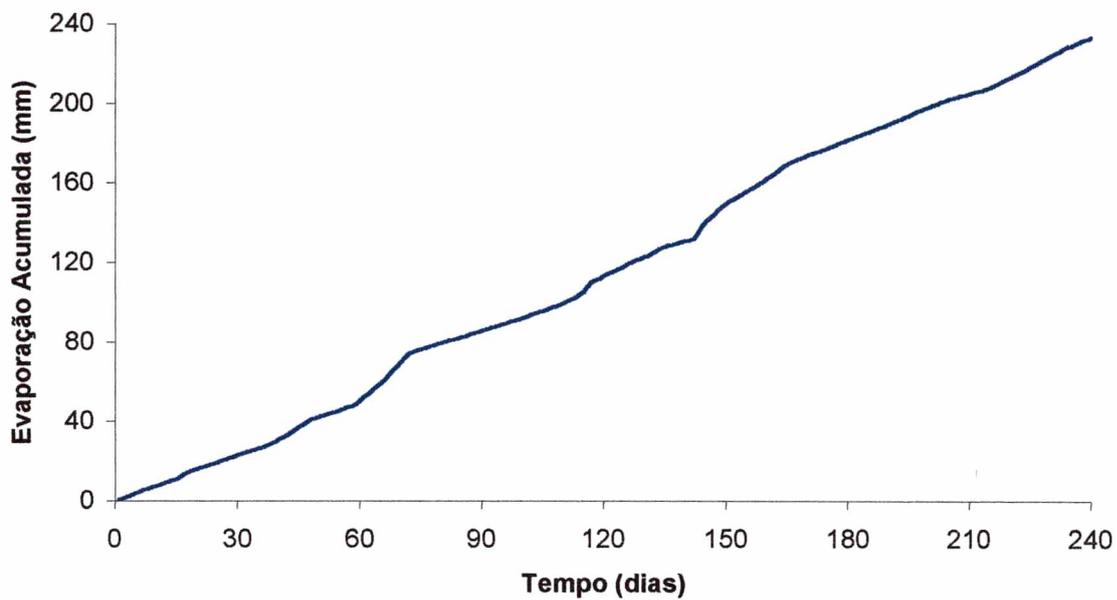


Figura 20 – Evaporação Acumulada.

Das Tabelas 12 a 14, que se encontram em Anexo, pode-se comentar que no primeiro mês, 23,039 mm de toda umidade que entrou em contato com os resíduos sólidos presentes nas células foram evaporados. Já no segundo mês, houve um aumento de 18,74%, e 27,358 mm de umidade sofreu evaporação. No terceiro mês, que conforme mencionado no tópico anterior,

apresentou um regime seco e com poucas chuvas, foram registrados 35,406 mm do parâmetro Evaporação., um aumento de 29,42%.

Observa-se, ainda, que 27,340 mm de água foram evaporados durante o quarto mês de monitoramento das células. Com o aumento da precipitação no quinto mês, aumentou também a quantidade de água evaporada em cerca de 39,59%, chegando ao valor de 36,797 mm.

No sexto mês, 31,966 mm de toda água sofreu evaporação e que 23,179 mm de água sofreram evaporação durante o sétimo mês de observação. No oitavo mês da pesquisa, 28,495 mm de água foram evaporados.

A evaporação acumulada para o período estudado foi de 233,544 mm e a média mensal de 29,193 mm.

4.2.3 Volume de Líquidos Percolados

Segundo CAPELO NETO et al (1999), a previsão da quantidade de percolado a ser gerado em aterros sanitários é um parâmetro crítico de projeto. O volume deste líquido produzido impactará nos custos de construção e operação, tanto do sistema de drenagem quanto do sistema de tratamento.

A quantidade de percolado formado poderá influenciar, também, na escolha do processo de tratamento a ser utilizado.

A principal preocupação durante o andamento dos trabalhos foi o monitoramento da produção de líquidos percolados e seus aspectos quantitativos. Adotou-se ainda, uma avaliação visual de sua coloração, de tons claros até mais escuros, sem se preocupar com seu caráter qualitativo.

A produção diária em cada uma das células pode ser vista nas Figuras 21, 22 e 23.

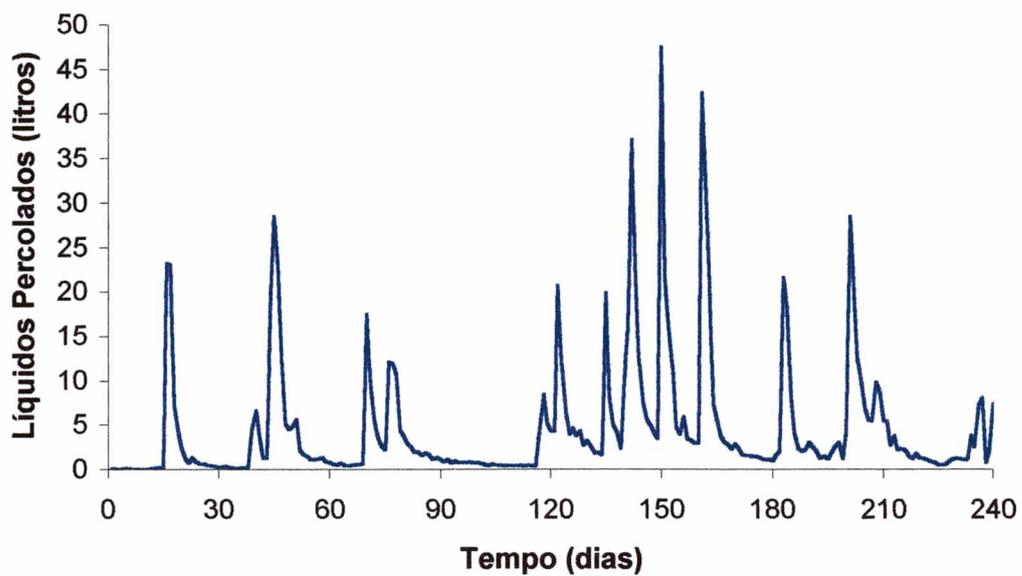


Figura 21 – Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 01.

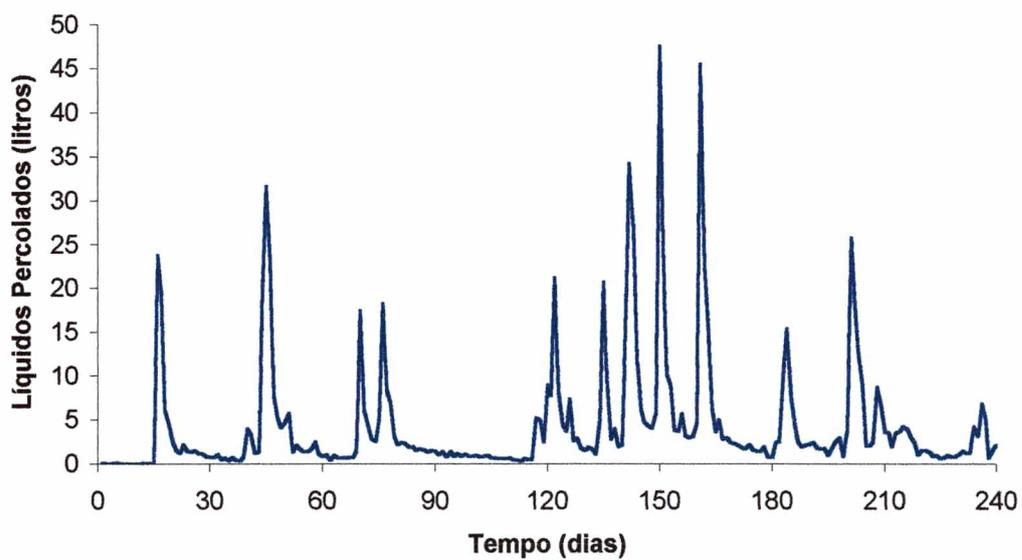


Figura 22 – Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 02.

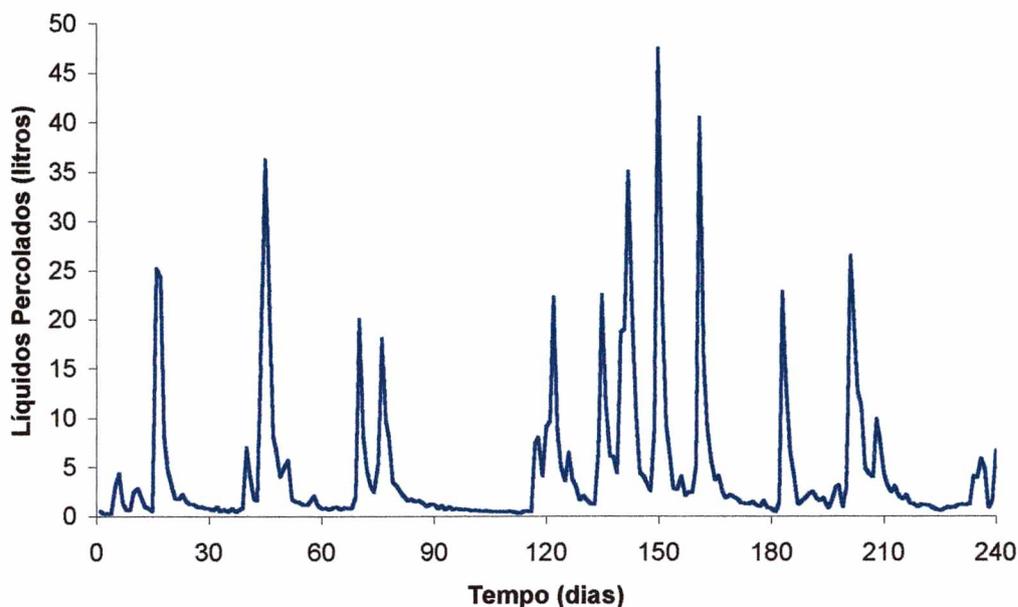


Figura 23 – Volume de Líquidos Percolados Produzidos na Célula 03.

A respeito deste parâmetro pode-se comentar que, globalmente, o comportamento das três células durante o primeiro mês foi praticamente igual e foram registrados 237,51 litros de líquidos percolados nas três células. Na primeira célula foi de 67,96 litros; na segunda célula, este valor foi de 69,96 litros de líquidos percolados e a terceira célula apresentou um valor sensivelmente maior que as anteriores: 99,59 litros durante os primeiros 30 dias. Fazendo-se uma média na produção de líquidos percolados para as três células, o seu valor é de 79,17 litros. Entretanto, nota-se que a terceira célula apresentou um valor maior que a média mensal. O segundo mês apresentou um incremento na produção de percolados, totalizando 408,14 litros de líquidos percolados, com uma média de 136,05 litros e um aumento de 71,84% em relação ao mês anterior. Isso se deu pelo aumento sensível de chuva ocorrido durante o segundo mês de observação. Da primeira célula foram coletados 134,5 litros de percolados, sendo que o seu maior valor se deu no 45º, com 28,50 litros.

Foram coletados 131,81 litros de líquidos percolados da segunda célula, que também registrou no 45º dia o seu pico na produção de percolados: 31,60 litros. A terceira célula produziu 141,83 litros de percolados durante o segundo mês de observações, com pico de 36,20 litros no dia 45. O terceiro mês apresentou um total de 321,39 litros de percolados e uma média de 107,13 litros para cada uma das células. Somente a segunda célula ficou abaixo da média mensal do valor total de líquidos percolados. Esta produziu 102,26 litros durante o referido período.

Durante o quarto mês de monitoramento, um mês com poucas chuvas, a produção de percolados diminuiu significativamente, e foi de apenas 125,91 litros, apresentando um decréscimo de 60,82% na produção total em relação ao mês anterior.

A primeira célula produziu 39,98 litros, apresentando um pico de 8,49 litros no dia 118. 41,81 litros de líquidos percolados foram produzidos na segunda célula, cujo maior valor mensal se deu no 120º dia: 41,81 litros. 9,10 litros foi o maior valor mensal de percolados na terceira célula, que acumulou durante 44,12 litros durante o mês. O quinto mês, bastante chuvoso, apresentou os maiores valores na produção de percolados, totalizando 863,7 litros, e estabelecendo um aumento de 585,97% em relação ao quarto mês de monitoramento, evidenciando uma relação estreita entre precipitação e percolação de umidade por entre a massa de resíduos, conforme discutido e estudado na literatura pertinente.

A média mensal na produção de líquidos percolados para as três células foi de 287,9 litros, sendo que a terceira célula ultrapassou essa média em mais de 5% e registrando o valor de 304,59 litros. O sexto mês foi marcado por um decréscimo de 33,82 % em relação ao mês anterior na produção de líquidos percolados e totalizou 571,56 litros.

Foram produzidos 543,79 litros de percolados durante o sétimo mês, com média de 181,26 litros para as três células. No oitavo mês de observações, houve um decréscimo na produção de percolados em torno de 64,06%, apresentou um total de 195,45 litros de percolados e com média de 65,15 litros.

No total foram produzidos 3266,62 litros de líquidos percolados durante o período de estudo, o que pode ser visto nas Figuras 24 a 26. A média mensal de produção de percolados foi de 408,328 litros e a diária de 13,61 litros e, o auge na produção de percolados deu-se nos meses com maior incidência de chuvas e a baixa na produção durante os meses de estiagem. As Tabelas 15 – 22 em Anexo, mostram a variação mensal na produção de líquidos percolados para as três células monitoradas.

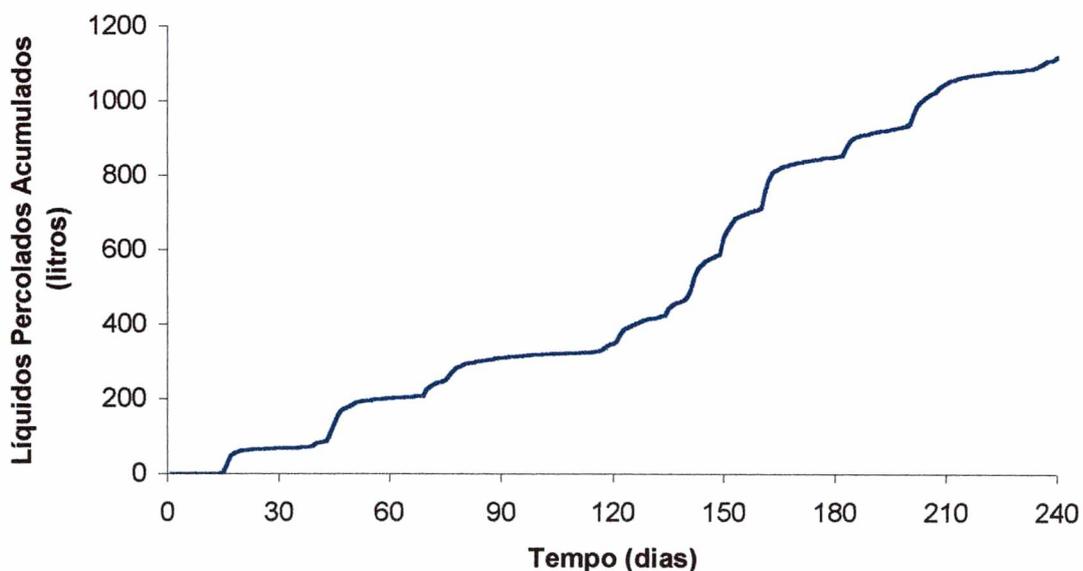


Figura 24 – Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 01.

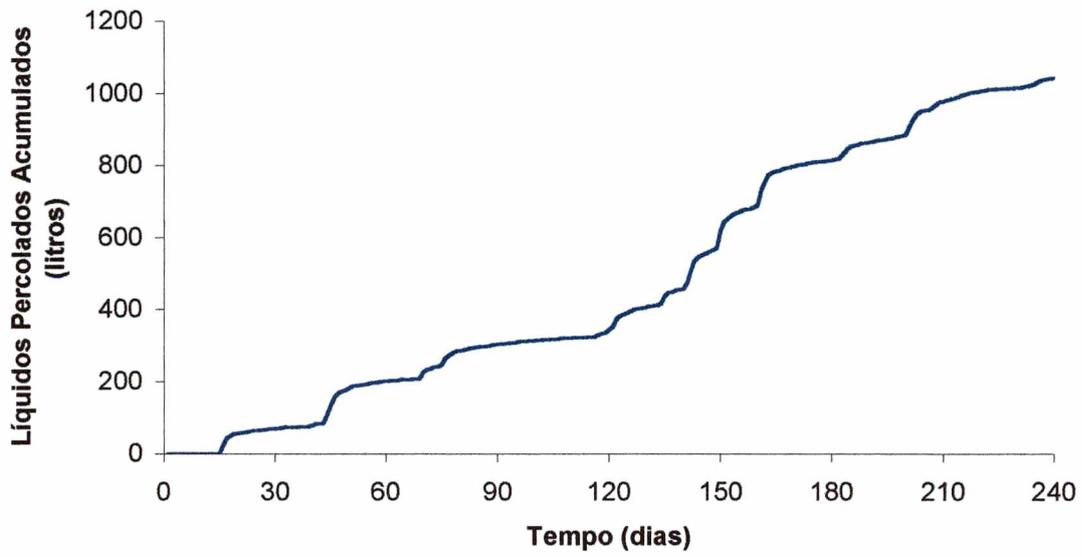


Figura 25 – Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 02.

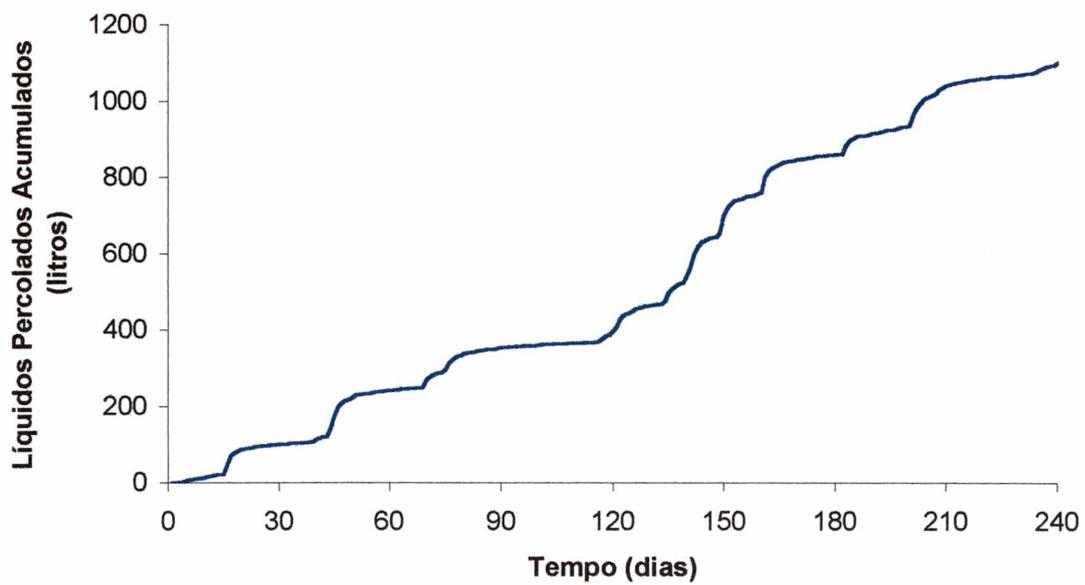


Figura 26 – Volume de Líquidos Percolados Acumulados na Célula 03.

4.2.4 Recalques

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam a variação deste parâmetro para as Células 1, 2 e 3 respectivamente. Nas Tabelas 23 a 30 em Anexo, são apresentados em detalhes estes valores acumulados.

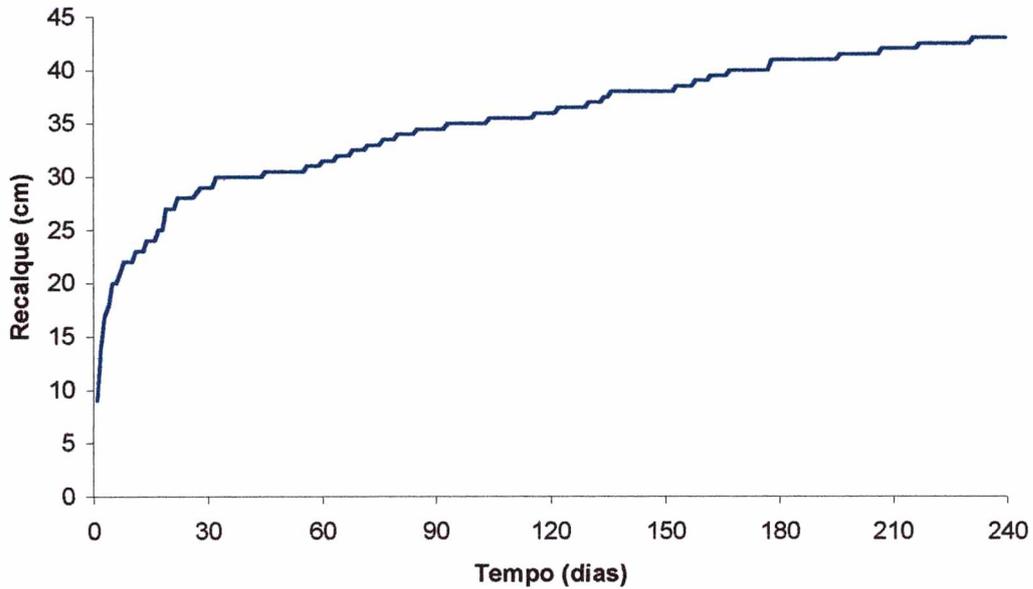


Figura 27 – Recalque na Célula 01

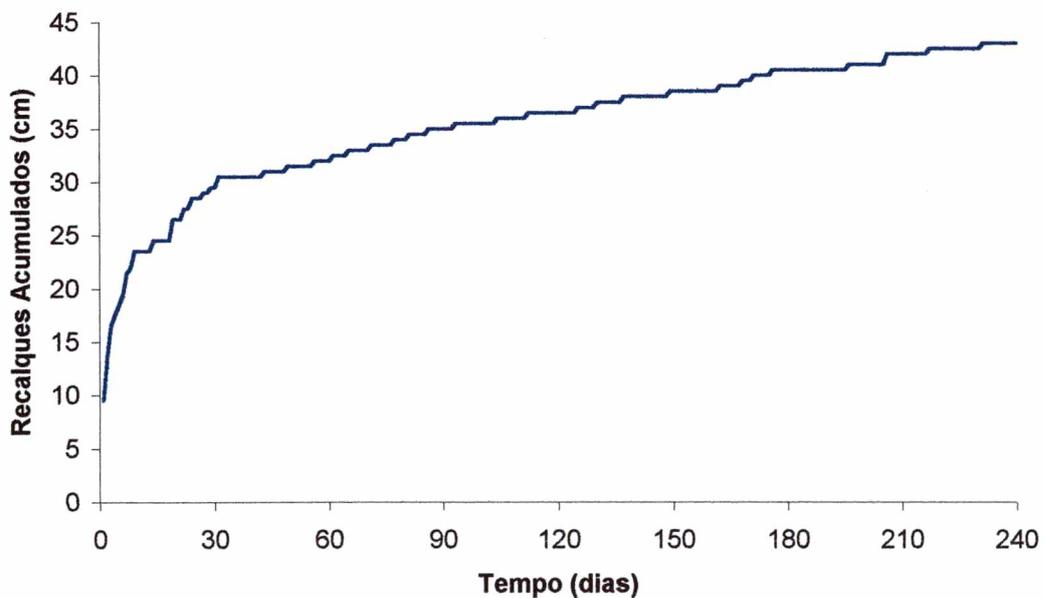


Figura 28 – Recalque na Célula 02.

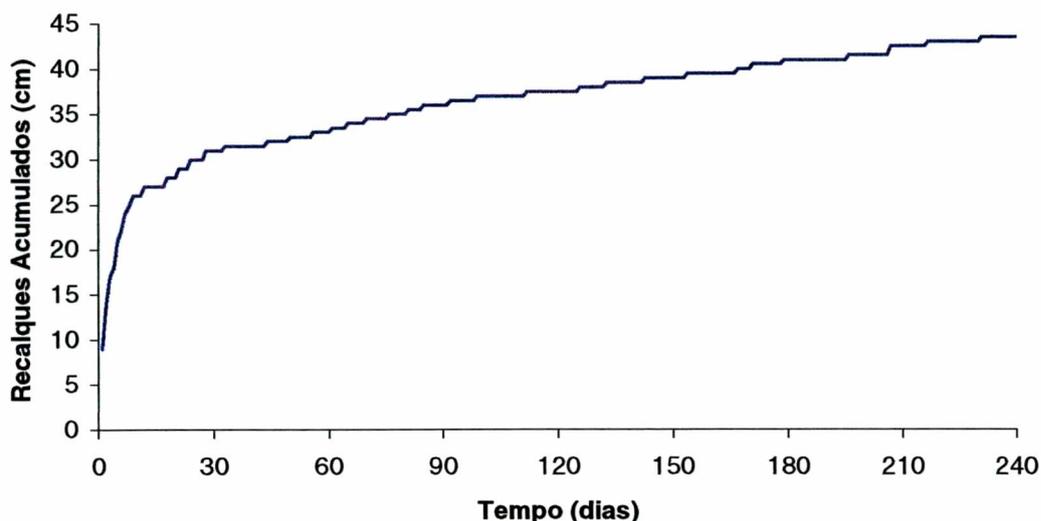


Figura 29 – Recalque na Célula 03.

Pode-se observar que a Célula 1 apresentou no primeiro dia um recalque de 9 cm em relação ao “dia zero”; no final do primeiro mês, o valor acumulado deste parâmetro foi de 29 cm, uma variação maior que 220% em relação ao 1º dia; no segundo mês de observações, o recalque para a primeira célula foi de 31,5 cm, já começando a apresentar variações menores, de apenas 2,5 cm em relação ao mês anterior, devido à degradação e acomodação dos resíduos.

No final do terceiro mês, o valor acumulado do recalque para a primeira célula foi de 34,5 cm, variando 3 cm durante o período. Já no quarto e quinto mês de monitoramento, os valores foram de 36 e 38 cm, respectivamente. No sexto e sétimo mês, os valores acumulados para o recalque foram de 41 e 42 cm, e no oitavo mês apresentou uma variação de 1 cm em relação ao mês anterior, com recalque acumulado de 43 cm, mostrando a tendência de variação para o referido parâmetro. As demais células, como se nota nas Figuras 28 e 29, apresentam comportamentos bastante similares aos da primeira: recalque acentuado nos primeiros dias devido a degradação e acomodação dos resíduos durante a percolação de águas das chuvas e uma certa estabilização no decorrer dos dias.

4.2.5 Temperatura

As temperaturas da massa de resíduos urbanos variaram de 21 a 34 °C, com leituras quinzenais. Geralmente, a Célula 1, pela posição em que se encontra em relação ao Sol, apresentou uma temperatura bastante próxima a ambiente, com 2°C de diferença para menos. Já as Células 2 e 3, variaram em relação a anterior, estando menores em cerca de 2 a 4 °C respectivamente.

4.3 Balanço Hídrico do Sistema, Estudo de Correlações e Comparações com o Método Suíço

4.3.1 Balanço Hídrico Geral do Sistema

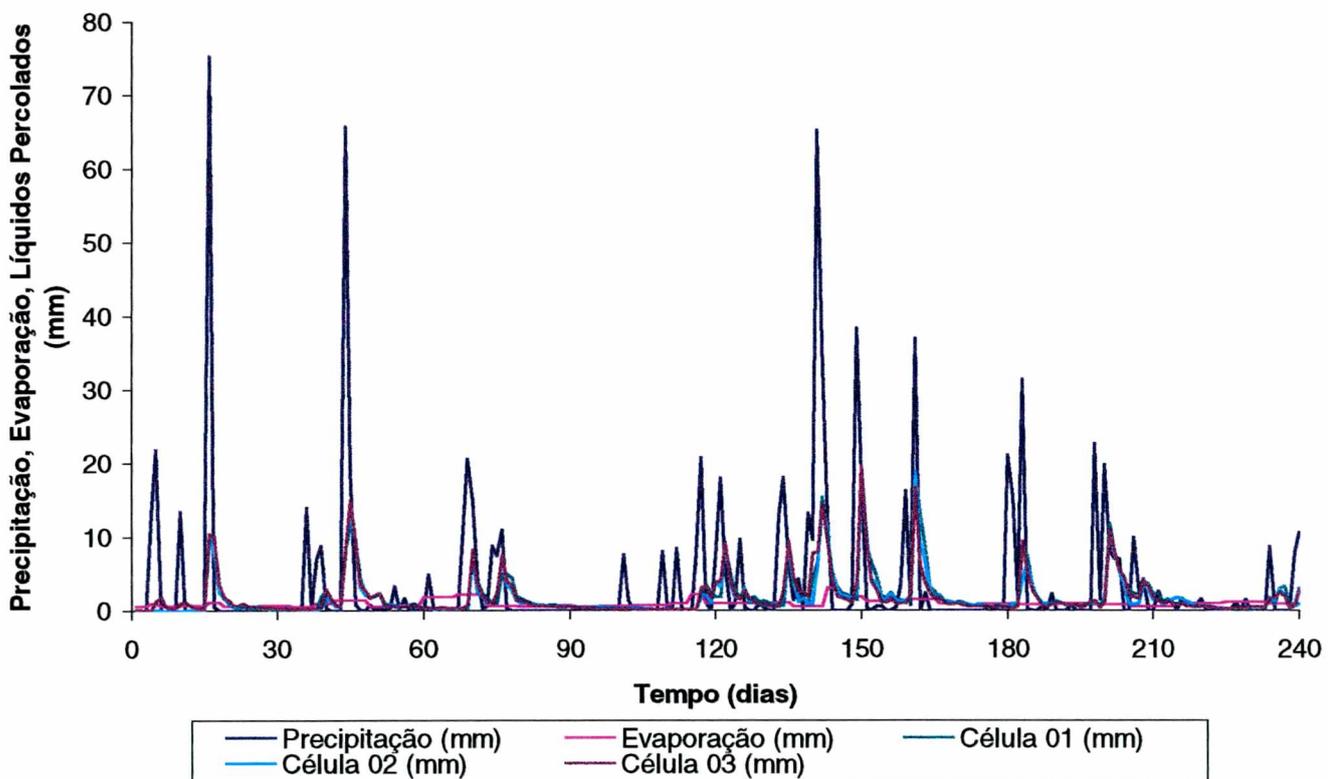


Figura 30 – Balanço Hídrico Geral do Sistema.

Na Tabela 31 são apresentados os valores dos parâmetros monitorados durante o período de estudo para o inteiro sistema:

Tabela 31 - Valores Mensais e Totais do Balanço Hídrico para o Aparato Experimental

Parâmetros Monitorados	Período de Monitoramento								
	(Meses)								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Total
Evaporação (mm)	23,039	27,358	35,406	27,340	36,797	31,966	23,179	28,495	233,58
Precipitação (mm)	126,636	122,979	84,209	64,132	272,767	83,439	134,637	41,227	930,026
Escoamento Superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Infiltração (mm)	126,636	122,979	84,209	64,132	272,767	83,439	134,637	41,227	930,026
Percolados (litros)	237,51	408,14	321,39	125,04	863,7	571,56	543,79	195,49	3266,62

Algumas considerações:

- Segundo BLIGHT et al (1997) e BENGTTSSON et al (1994), uma forma de estimar a quantidade de líquidos percolados é mediante um balanço hídrico, o que envolve a somatória de toda água que entra no aterro sanitário menos a que sai (por evaporação, por exemplo), a diferença será o volume de líquidos percolados produzidos. Em nosso experimento, as variáveis do balanço hídrico não foram calculadas, e sim medidas diariamente, onde se pode visualizar o comportamento hidráulico dentro de um aterro sanitário;
- Verificou-se durante a pesquisa que, conforme esclarecido por PINEDA (1998), ROOCA (1993) e TCHOBANOGLIOUS et al (1993), a quantidade de líquidos percolados produzidos por um aterro sanitário foi fortemente influenciada pelas precipitações registradas na região, que totalizaram 930,026 mm de chuva, sendo que o maior valor mensal registrado se deu

no 5º mês, e o menor no 8º, com produção total de 3267,49 litros de líquidos percolados;

- FARQUHAR (1988), argumenta que o volume de líquidos percolados depende primariamente das perdas de umidade por evaporação e a da água que infiltra através do material de cobertura e dos resíduos aterrados. O volume varia no decorrer do ano: durante os períodos de alta precipitação, grande quantidade de água pode percolar através dos resíduos abaixo do solo de cobertura. Quanto há poucas perdas por evaporação ou quando estas nem mesmo ocorrem, o volume de líquidos percolados aumenta, o que pôde ser visto no decorrer do projeto, levando-se em consideração o material de cobertura escolhido, que através de um ensaio de infiltração revelou uma capacidade de infiltração de 680 mm/h, favorecendo a entrada de umidade na massa de resíduos aterrada;
- A análise dos resultados de volumes de líquidos percolados nas três células evidenciou que, devido ao solo usado como material de cobertura, com alto índice de permeabilidade, houve uma produção bastante significativa de líquidos percolados totalizando 3267,49 litros. Isso ocorreu pelo fato de que toda a precipitação incidente sobre as células realmente infiltrava, o que é comentado por CANZIANI e COSSU (1989), que dentre as fontes de umidade que interagem com os resíduos urbanos, a água que entra pela face superior através da percolação pela camada de cobertura corresponde à parcela mais relevante na geração de líquidos percolados;
- Há na literatura várias formulações empíricas e semi-empíricas para a estimativa da parcela de umidade presente no solo de cobertura que é transferida para a atmosfera por evaporação direta ou por transpiração dos vegetais. Estas equações foram estabelecidas com base em ajustes das variáveis envolvidas, para algumas regiões e condições específicas, como as desenvolvidas por TUCCI (1997). Por causa disso, IPT/ CEMPRE (2000) salienta que sempre que possível, deve-se dar preferência a dados obtidos por medições diretas, e que algumas estações meteorológicas contam com

instrumental adequado para a estimativa da evaporação (tanques de evaporação) ou da evapotranspiração (lisímetros), o que foi realizado durante o período de estudo.

4.3.2 Estudo de Correlações entre Parâmetros do Balanço Hídrico

4.3.2.1 Precipitação e Líquidos Percolados

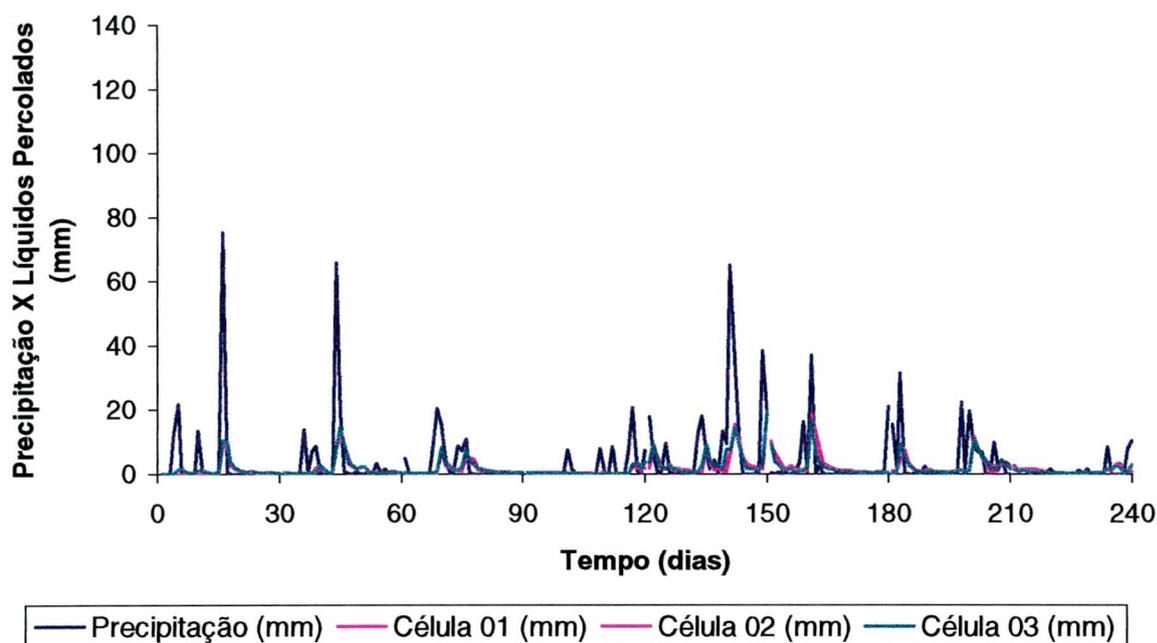


Figura 31 – Comparação da Precipitação com Líquidos Percolados

A Figura acima mostra a tendência dos líquidos percolados acompanharem os valores da precipitação. Nesta, vê-se que o parâmetro precipitação é o principal contribuinte para a formação de líquidos percolados, e isso está de acordo com os autores LU et al, (1981), que argumentam que, quanto maior a disponibilidade de água, maior será a probabilidade de formação de líquidos percolados. Conforme explicações de BENGTTSSON et al (1994), enquanto a capacidade de campo não é atingida em todas as partes de um aterro sanitário, parte da água que percola entre os resíduos aterrados é estocada.

Isto pode ser visto em alguns momentos, já que o pico de líquidos percolados produzidos não correspondia com os picos da precipitação. EHRIG (1983) mostra que em algumas partes do aterro, a umidade que infiltra pelo material de superfície pode acumular-se e ser armazenada por anos antes que qualquer água deixe o aterro. A quantidade potencial do lixiviado que poderá ser gerada em um aterro sanitário específico é a quantidade de umidade excedente da capacidade de campo do aterro. Neste caso específico, os picos de produção de líquidos percolados se deram dois ou três dias depois dos picos de chuva.

4.3.2.2 Outras Correlações

A pesquisa por correlações entre outros parâmetros pode ser observada na Tabela 32 abaixo :

Tabela 32 – Comparações entre Outros Parâmetros Monitorados no Estudo do Balanço Hídrico

CÉLULA	PESO ESPECÍFICO (kg/m³)	UMIDADE (litros)	LIQUIDOS PERCOLADOS (litros)	RECALQUES (cm)
1	325,21	914,58	1.121,79	43,0
2	298,29	842,00	1.044,00	43,0
3	343,93	964,55	1.100,83	43,5

Por outro lado, apesar da pequena diferença de valores dos pesos específicos dos resíduos nas diferentes células, observa-se uma tendência igualmente direta entre este parâmetro e a geração de líquidos percolados. Ao observarem-se os valores limites, superior e inferior, do peso específico (célula 3 e célula 2) percebe-se esta correlação.

Finalmente, assim como para o peso específico, observa-se uma correlação direta também entre o teor em umidade inicial dos resíduos e a geração de líquidos percolados : quanto maior o teor de umidade inicial, maior a geração de líquidos percolados em cada célula, de modo geral. Esta observação é particularmente verdadeira para os primeiros 30 dias de observação da geração de líquidos percolados (célula 1 = 67,96 l; célula 2 = 69,96 l e célula 3 = 99,59 l). Não se observa correlação para os recalques.

4.3.3 Comparações com o Método do Balanço Hídrico

Segundo BLIGHT et al. (1997), pode-se expressar a relação do balanço hídrico da seguinte forma:

$$P + U_w = E + G + L + R + \bullet U_w + \bullet U_s$$

Onde :

- P = Precipitação;
- U_w = Água presente nos resíduos durante a sua disposição;
- E = Evaporação;
- G = Vapor d'água que sai com os gases;
- L = Líquidos percolados;
- R = Escoamento superficial;
- $\bullet U_w$ = Água absorvida e retida pelo resíduos urbanos;
- $\bullet U_s$ = Água absorvida e retida pelo material usado como cobertura.

Para aplicação desta expressão aos dados coletados durante a pesquisa, foram necessários alguns ajustes:

- O termo G foi ignorado por entender-se que é pequeno, comparativamente aos outros termos;
- A capacidade de campo das células monitoradas foi alcançada, assim, os termos U_w e $\bullet U_w$ saem da equação do balanço hídrico;

- O material de cobertura, com alta capacidade de infiltração, relacionado aqui com o termo U_s , também teve a sua capacidade atingida e também pode ser eliminado da equação.

Desta maneira, a expressão adaptada em função da geração dos líquidos percolados, pode ser escrita da seguinte forma: $L = P - E - R$. Fazendo uma aplicação do método do balanço hídrico, tem-se a seguinte estimativa para o sistema inteiro:

Tabela 33 - Resultados da Comparação do Método do Balanço Hídrico Adaptado e Dados Experimentais

PARÂMETROS MONITORADOS	PERÍODO DE MONITORAMENTO (MESES)								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Total
Percolados Medidos (mm)	98,233	168,806	132,926	51,716	357,225	235,292	224,911	80,854	1349,963
Percolados Estimados (mm)	103,597	95,621	48,803	36,792	235,970	51,473	111,458	12,732	696,446

Da Tabela 33, pode-se notar algumas diferenças entre os volumes de líquidos percolados medidos em campo e os estimados. No primeiro mês o valor medido foi de 98,233mm, enquanto que o estimado seria de 103,597mm, o que significa uma diferença de 5,18%. Já no segundo mês, houve uma inversão, e o volume estimado seria de 95,621mm enquanto que, o medido foi 168,806mm. No terceiro mês, confrontando-se os valores, nota-se uma diferença mais acentuada, enquanto que o volume estimado seria de 48,803mm, o medido foi de 132,926mm, uma diferença de 84,123 mm. No quarto mês, os valores foram mais próximos, enquanto o estimado foi de 36,792mm, o coletado em campo foi de 51,716mm, uma diferença de 40,56% nos valores.

No quinto mês, com maior incidência de precipitação, houve um incremento na produção de líquidos percolados, mas mesmo assim, o valor estimado foi menor do que o coletado em campo, apresentando uma diferença de 121,255mm. A diferença foi ainda maior no sexto mês de monitoramento, cerca de 183,819mm. Nos últimos meses também ficaram evidentes as diferenças entre os valores reais e os estimados. Para o sétimo mês, o volume de líquidos percolados estimados foi de 111,458mm, sendo que foram coletados 224,911mm. Já no oitavo e último período de observações, a diferença foi de 68,122mm.

O método do proposto por BLIGHT et al. (1997) e com modificações para o caso estudado, conseguiu estimar apenas 696,446mm de líquidos percolados, apenas 51,59% do volume do volume total de líquidos percolados gerados no período de estudo. Outros pesquisadores também encontraram diferenças marcantes ao usarem tal método. Por exemplo, CAPELO et al (1999), estudaram a geração de líquidos percolados em aterro sanitário em regiões com balanço hídrico deficitário utilizando tal método e constataram que este deixa a desejar no que diz respeito à precisão; já que a geração de percolado pelo método foi cerca de 80 vezes maior que a gerada.

Já FARQUHAR (1988), relata que KMET (1982) obteve excelentes resultados utilizando o método do balanço hídrico para simular a produção de líquidos percolados em oito lisímetros de campo. O fluxo de líquidos percolados variou no intervalo de 16,6 até 22,1% da precipitação em base anual. Contudo, LU et al. (1981), fez comparações similares em 5 aterros sanitários diferentes usando 25 métodos diferentes para estimar a geração de líquidos percolados e em média, os fluxos estimados mostraram-se 100 vezes maiores que os medidos em campo. Neste caso em questão, o método mostrou-se razoável, mas os valores estimados estiveram cerca de 1,94 vez menores que os obtidos em campo.

4.3.3 Comparações com o Método Suíço

Comparando-se com um outro método bastante popular, o Método Suíço, tem-se os valores apresentados na Tabela 33. Para esta estimativa foram usados os seguintes valores:

- $K = 0,50$ (para aterros fracamente compactados);
- Área = $7,2534 \text{ m}^2$ (área total interna das células);
- Para a relação $1/t$, o termo t vale 259200 seg. (número de segundos em um mês)

Tabela 34 - Resultados da Comparação do Método Suíço e Dados Experimentais

PARÂMETROS MONITORADOS	PERÍODO DE MONITORAMENTO (MESES)								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Total
Percolados Medidos (mm)	98,233	168,806	132,926	51,716	357,225	235,292	224,911	80,854	1349,963
Percolados Estimados (mm)	633,18	614,64	421,67	321,61	1365,08	418,09	671,81	207,26	4653,34

Dos valores apresentados, nota-se que os estimados pelo Método Suíço mostraram-se 3,44 vezes maiores do que o volume de líquidos percolados gerados durante os meses de estudo. Para CAPELO et al (1999), utilizando tal método, a diferença entre o estimado e o gerado foi de 84 vezes. Estes sugerem então, que seja desenvolvido um método que consiga prever com maior precisão o volume de líquidos percolados gerados, de forma a adequar as dimensões das estações de tratamento de tais líquidos, diminuindo assim seus custos de construção e operação.

4.4 Generalização dos Resultados do Estudo Experimental e Aplicações

As recomendações preliminares deste trabalho servem para o tipo de resíduos urbanos utilizado, grau de compactação e para as condições climatológicas da cidade de Florianópolis. Se o aterro projetado sofrer um outro regime de chuvas e evaporações, receber resíduos sólidos com outras características e diferente solo de cobertura, assim também como maiores compactações, serão necessários cuidados específicos. Segundo MEDEIROS (2001), de qualquer forma, os resultados apresentados servem como primeira referência por tratarem-se, como já foi dito, de um caso limite superior, com vazões máximas de líquidos percolados, para as características da presente pesquisa. Uma tentativa de resumir a influência dos outros fatores seria considerar apenas os 5 mais importantes tais como :

- Precipitação anual média: (P)
- Diâmetro 50% do solo de cobertura : (d_{50})
- Características principais dos resíduos urbanos, como teores de matéria orgânica e umidade: (M O ; U)
- Evaporação : (E)
- Grau de compactação dos resíduos urbanos (ou peso específico): ρ
- (f) : função genérica

Os três primeiros parâmetros são diretamente proporcionais às vazões de líquidos percolados e os dois últimos são inversamente proporcionais. Assim, segundo MEDEIROS (2001), uma primeira relação qualitativa, de caráter preliminar e aproximado pode ser:

$$\text{PERC} = f (P \times d_{50} \times MO \times U) / (E \times \rho)$$

O presente trabalho está longe de ter a extensão suficiente para determinar a função acima proposta. De qualquer forma, serve como indicação de um caminho que pode ser seguido por futuras pesquisas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho estudou-se a geração de líquidos percolados em aterros sanitários através do monitoramento de parâmetros usados para o cálculo do balanço hídrico nestas instalações de destino final de resíduos urbanos.

A revisão bibliográfica focalizou a problemática dos resíduos sólidos na atualidade, como a crescente a sua produção e as principais técnicas de disposição final e tratamento disponíveis e adequados para cada realidade. O aterro sanitário foi a parte central deste capítulo, assim como os mecanismos de biodegradação dos resíduos com ênfase na formação dos líquidos percolados e métodos de previsão qualitativa de sua geração.

Montou-se uma estrutura de concreto em que foram depositados resíduos urbanos provenientes da coleta regular da Cidade de Florianópolis, onde foram monitorados os fatores que interferem na formação de líquidos percolados em aterros sanitários, uma vez que estes têm um alto potencial poluidor.

A parte final do trabalho apresentou os resultados obtidos durante os oito meses de pesquisa, de 12 de maio de 2001 até 07 de janeiro de 2002, e faz uma análise dos mesmos com os métodos propostos para se determinar o comportamento hidráulico de um aterro sanitário.

Destes resultados, chegou-se a algumas conclusões:

- é possível reproduzir em laboratório o comportamento de um aterro sanitário, através de células em escala piloto;
- que fatores como a disponibilidade de água, as condições do material de cobertura das células e as características dos resíduos aterrados influenciam a formação de líquidos percolados;

- que o parâmetro precipitação, conforme descrito na literatura, constitui-se a principal fonte de umidade que contribui na geração de líquidos percolados;
- que os maiores volumes de líquidos percolados foram gerados quando houve uma incidência maior de chuvas;
- a relação existente entre os parâmetros precipitação e evaporação é a de que quanto maior a disponibilidade de água, maior será a parcela passível de sofrer evaporação;
- que a parcela de água que sofre evaporação não resultará na formação de líquidos percolados, antes, favorecerá que os seus valores sejam menores ou que nem ocorram, caso não haja contribuições externas de umidade;
- que os recalques em todas as células foram maiores enquanto os resíduos urbanos ainda estavam se acomodando nas mesmas;
- a temperatura da massa de resíduos sólidos é dependente do ponto em que se faz a amostragem e do estágio de decomposição em que os mesmos se encontram;
- que os métodos de estimativa de geração de líquidos percolados em aterros sanitários, embora populares, pecam no que diz respeito à precisão dos resultados, ora superestimam ora ficando abaixo dos valores reais;
- é possível estabelecer um balanço hídrico com as variáveis monitoradas durante o período do estudo, uma vez que a estrutura montada mostrou-se eficaz.

Ao término das atividades desenvolvidas durante o período estudado, e após a sua avaliação, foram levantadas algumas diretrizes para a continuidade dos trabalhos de pesquisa e complementação das informações obtidas, sendo:

- Ampliar o período de estudo, com o objetivo de completar a série histórica de dados, abrangendo assim, os períodos de estiagem e chuva, concluindo desta forma, o ano hidrológico;
- Verificar o efeito de novos tipos de solo de cobertura, o que poderá ser feito pelo uso de pequenos pilotos, nos quais poderão ser analisados parâmetros tais como: porosidade do solo, coeficiente de permeabilidade, granulometria, o efeito da precipitação e sua distribuição nos mesmos e a sua capacidade de armazenamento de água;
- Determinar através de testes em laboratório as diferentes capacidades de retenção de umidade dos diversos componentes presentes nos resíduos urbanos coletados;
- Fazer análises qualitativas dos líquidos percolados gerados diariamente, para determinar as suas características inerentes;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, R. KHAN, L. GIL, J. A. **Diseño y Funcionamiento de un Lisímetro Hidráulico para Medición de la Evapotranspiración Potencial.** Bioagro: 10(1):11-17. Cagua, Venezuela. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimentos: NBR 8419.** São Paulo. 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimentos: NBR 8849.** Rio de Janeiro. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos – Procedimento: NBR 7229.** São Paulo. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação: NBR 10004.** São Paulo. 1987. 63 p.

BENGTSSON, L., BENDZ, D., HOGGLAND, W., ROSQVIST, H. AKESSON, M. **Water Balance for Landfills of Different Age.** Journal of Hydrology, n. 158, p. 2003-2217. 1994.

BIDONE, F. R. A. & POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos.** São Carlos: EESC:USP 1999. 120 p.

BLIGHT, G. E., HOJEM, D. J., BALL, J. M. **Production of Landfill Leachate in Water-Deficient Areas.** In: T. H. Christensson, R. Cossu and R. Stegmann. Landfilling of Waste: Leachate. London: Chapman and Hall, 1997. p. 35-55.

BORGES DE CASTILHOS, A. **Estudo da Previsão dos Volumes de Líquidos Percolados Gerados em Aterros Sanitários.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16, Goiânia, 1991. Anais... Goiânia.: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1991. 550p. p. 114-124.

BORGES DE CASTILHOS, A. **Resíduos Sólidos,** [2000]. Notas de Aula. Digitado.

CAMPBELL, D. J. V. **Environmental Management of Landfill Sites.** Journal IWEN, n.7, p. 170-174. 1993.

CANZIANI, R. & COSSU, R. **Landfill Hydrology and Leachate Production.** Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. Academic Press. 1989.

CAPELO NETO, J., MOTA, S., SILVA, F. J. A. **Geração do Percolado em Aterro Sanitário no Semi-Árido Nordestino: uma abordagem quantitativa.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, v. 4, n. 3/4, 1999.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital. **Limpeza Pública.** Disponível em <http://www.pmf.sc.gov.br/perfil_de_florianopolis/limpeza.html> Acesso em: 14 de janeiro de 2002.

DECKA, I. **Dynamique du Tassement Dans Une Décharge de Déchets Solides Urbains**. Lausanne / França, 1995. Dissertação (Mestrado) – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

EHRIG, H. J. **Quality and Quantity of Sanitary Landfill Leachate**. Waste Management & Research I, p. 53-68. 1983.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Investigation of Sanitary Landfill Behavior**. Ohio. Environmental Protection Agency. 1979.

FARQUHAR, G. J. **Leachate: production and characterization**. Disponível em: < <http://www.cepis.org.pe/muwww/fulltext/repind49/lesson10/leachate.html>> Acesso em: 05 de fevereiro de 2001.

FENN, D.G., HANLEY, K. J., DEGEARE, T.V. **Use of Water Balance Method for Predicting Leachate Generation at Waste Disposal Sites**. Cincinnati (Ohio): U.S. Environmental Protection Agency, 1975, 168 p.

FORESTI, E., FLORÊNCIO, L., VAN HAANDEL, A., ZAIAT, M., CAVALCANTI, P. F. F. **Fundamentos do Tratamento Anaeróbio**. In: Tratamento de Esgoto por Processos Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. Rio de Janeiro: ABES. 1999.

FUNGAROLI, A.A., STEINER, R. L. **Investigation of Sanitary Landfill Behavior**. Vol. 1. EPA – 600/2-79-053A. 1979

GEE, J. R. **Prediction of Leachate Accumulation in Sanitary Landfills**. In: APPLIED RESEARCH & PRACTICE ON MUNICIPAL & INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 4, 1981. Madison. Anais... Madison: University of Wisconsin, 1981. p. 170 – 190.

GOMES, L. P., CONCEIÇÃO, D. C., FLECK, A. **Avaliação dos Recalques em Sistemas Piloto de Aterramento de Resíduos Sólidos Urbanos**. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, Foz do Iguaçu, 1997. Anais... Foz do Iguaçu.: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1997.

HAMADA, J. & ABEICHE, L. H. T. **Ferramenta Computacional para Estimativa do Volume Mensal de Percolados em Aterros Sanitários.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, João Pessoa, 2000. Anais... João Pessoa.: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2000.CD ROM.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.** Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/lixo_coletado/lixo_coletado110.shtm Acesso em: 01 de julho de 2002.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** 2. ed. São Paulo: IPT: CEMPRE, 2000.

KMET, P. **Environmental Protection Agency's 1975 Water Balance Method – Its use and Limitations.** Guidance Report, Bureau of Solid Waste Management, Wisconsin Department of Natural Resources, Madison, MI. 1982.

LEDESMA, M. T. O., GÓMEZ, J. S., RIVERA, R. C. & VALENCIA, M. N. R. **Método de Balance de Água ara la Estimación de la Generación de Líquidos Percolados em Rellenos Sanitarios.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. Porto Alegre, 2000. Anais...Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. 521p. CD-ROM.

LIMA, L. M. Q, **Resíduos urbanos: Tratamento e Biorremediação.** 3. ed. São Paulo: Hemus, 1995.

LO, I. M. C. **Characteristics and Treatment of Leachate from Domestic Landfills.** Environment International, v. 22, n. 4, p. 433-442, 1996

LU, J. C. S., EICHENBERG, B., & STEARNS, R. J. **Leachate from Municipal Landfills, Production and Management.** Pollution Technology Review. New Jersey: Noyes Publications, n. 119, 1981.

MEDEIROS, P. A. **Relatório dos Modelos Físicos Realizados no Laboratório de Hidráulica do ENS – 1999-2001.** ENS/CTC/UFSC. Publicação Interna. 2001.

MEDEIROS, P. A., SILVA, J. D., DELAZARI, P. V. A, CASTILHOS JUNIOR, A.B. **Monitoreo Del Balance Hídrico en Basura Domiciliaria Urbana.** In: III SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GESTÃO AMBIENTAL URBANA E INDUSTRIAL. Porto Alegre, 2002. Anais...Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. CD-ROM. 2002.

MODESTO FILHO, P. **Reciclagem da Matéria Orgânica Através da Vermicompostagem.** In: BIDONE, F. R. A. (org). Metodologias e Técnicas de Minimização, Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 65 p.

MUSTIN, M. **Le Compost.** Editions François Dubusc. Paris, 1987.

NERILO, N. **Pluviometria e Chuvas Intensas no Estado de Santa Catarina.** Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 1999.

QUASIM, S. R., BURCHINAL, J. C. **Leaching from Simulated Landfills.** Journal of Water Pollution. Control Fed., 42(3):371-379. 1970

OLIVEIRA, L. & PASQUAL, A. **Monitoramento de Lixiviados de Aterro Sanitário.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. Porto Alegre, 2000. Anais...Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. 521p. CD-ROM.

ORTH, M. H. A., TAKEDA, C. K. **Aterros Sanitários.** São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1988.

PINEDA, S. **Manejo y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos.** Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, [s.l.] : Panamericana Formas e Impresos. 1998.

PINTO, N. L. S. **Hidrologia de Superfície.** Curitiba: Centro de Estudo e Pesquisa de Hidráulica e Hidrologia da Universidade Federal do Paraná, 1976.

RADEMAKER, A. D.; YOUNG, J. C. **Analysis of Leachate from Solid Residues Produced at Urban Waste-to-Energy Facilities.** Engineering Research Institute. Iowa State University, 1980.

ROCCA, A. C. C., et al. **Resíduos Sólidos Industriais.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 234p.

SCHALCH, V. **Vermicompostagem de Substratos Alternativos.** In: BIDONE, F. R. A. (org). Metodologias e Técnicas de Minimização, Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 65 p.

SEGATO, L. M. & SILVA, C. L. **Caracterização do Lixiviado do Aterro Sanitário de Bauru.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. Porto Alegre, 2000. Anais...Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. 521p. CD-ROM.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill, 978 p. 1993.

TEIXEIRA, E. N. & BIDONE, F. R. A. **Conceitos Básicos**. In: BIDONE, F. R. A. (org). Metodologias e Técnicas de Minimização, Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

TEIXEIRA, E. N., FASSINA, L. T. C. V. S, CASTRO, V. L. F. L. **Potencial de Minimização de Resíduos Sólidos Domésticos em Termos de Matéria Orgânica e Embalagens**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, Foz do Iguaçu, 1997. Anais... Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1997.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. **The Water Balance**. Publications in Climatology, vol. 8, n.º 1, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey, USA; 1955

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997.

TURC, L. **Le Bilan d'Eau Sols – Relation entre les Precipitation, L'Evaporation et L'Écoulement**. Ann Agron, 5:491-596; 6:5-131. 1954

WARITH, M. **Bioreactor Landfills: Experimental and Field Results**. Ryerson Polytechnic University. Ontario, Canada. 2001

ANEXO A

Valores da Precipitação

Tabela 9 - Valores da Precipitação do dia 1 – 90

Tempo (dia)	Precipitação (mm)	Tempo (dia)	Precipitação (mm)	Tempo (dia)	Precipitação (mm)
01	0,000	31	0,239	61	4,897
02	0,000	32	0,000	62	0,113
03	0,000	33	0,000	63	0,000
04	13,052	34	0,000	64	0,075
05	21,905	35	0,000	65	0,000
06	0,000	36	13,938	66	0,000
07	0,000	37	0,245	67	0,000
08	0,000	38	6,969	68	10,924
09	0,000	39	8,777	69	20,530
10	13,429	40	0,286	70	14,993
11	0,000	41	0,000	71	4,520
12	0,000	42	0,000	72	0,188
13	0,000	43	0,000	73	0,659
14	0,109	44	65,734	74	8,852
15	0,904	45	19,052	75	7,346
16	75,396	46	0,791	76	10,924
17	0,527	47	0,094	77	0,188
18	0,000	48	0,000	78	0,000
19	0,000	49	0,810	79	0,000
20	0,000	50	0,000	80	0,000
21	0,000	51	0,188	81	0,000
22	0,000	52	0,320	82	0,000
23	0,000	53	0,122	83	0,000
24	0,000	54	3,334	84	0,000
25	0,000	55	0,094	85	0,000
26	0,429	56	1,676	86	0,000
27	0,000	57	0,000	87	0,000
28	0,716	58	0,207	88	0,000
29	0,169	59	0,103	89	0,000
30	0,000	60	0,000	90	0,000
TOTAL	126,636	TOTAL	122,979	TOTAL	84,209

Tabela 10 - Valores da Precipitação do dia 91 – 180

Tempo (dia)	Precipitação (mm)	Tempo (dia)	Precipitação (mm)	Tempo (dia)	Precipitação (mm)
91	0,000	121	17,893	151	0,282
92	0,000	122	5,650	152	0,000
93	0,151	123	0,000	153	0,565
94	0,094	124	0,847	154	0,659
95	0,000	125	9,606	155	0,000
96	0,000	126	0,377	156	0,000
97	0,151	127	0,000	157	0,452
98	0,000	128	0,000	158	3,447
99	0,000	129	0,904	159	16,198
100	0,377	130	0,377	160	0,716
101	7,553	131	0,000	161	36,917
102	1,375	132	0,000	162	0,000
103	0,113	133	12,808	163	2,411
104	0,075	134	18,082	164	0,000
105	0,000	135	6,121	165	0,000
106	0,000	136	1,413	166	0,000
107	0,188	137	4,294	167	0,000
108	0,188	138	0,188	168	0,000
109	8,005	139	13,241	169	0,000
110	0,621	140	9,568	170	0,000
111	0,000	141	65,169	171	0,000
112	8,476	142	35,862	172	0,000
113	0,000	143	12,770	173	0,000
114	0,000	144	0,000	174	0,000
115	0,000	145	0,000	175	0,000
116	7,722	146	0,000	176	0,546
117	20,718	147	0,000	177	0,151
118	0,979	148	0,810	178	0,000
119	0,000	149	38,329	179	0,000
120	7,346	150	18,458	180	21,095
TOTAL	64,132	TOTAL	272,767	TOTAL	83,439

Tabela 11 - Valores da Precipitação do dia 181 - 240

Tempo (dia)	Precipitação (mm)	Tempo (dia)	Precipitação (mm)
181	15,482	211	2,580
182	1,582	212	0,885
183	31,379	213	1,186
184	0,188	214	1,130
185	0,000	215	0,000
186	0,000	216	1,695
187	0,471	217	1,036
188	0,000	218	0,659
189	2,260	219	0,734
190	0,000	220	1,563
191	0,000	221	0,000
192	0,000	222	0,000
193	0,753	223	0,000
194	0,000	224	0,000
195	0,000	225	0,000
196	0,000	226	0,000
197	0,000	227	1,130
198	22,602	228	0,000
199	1,507	229	1,507
200	19,780	230	0,000
201	8,006	231	0,000
202	7,008	232	0,000
203	6,969	233	0,000
204	0,000	234	8,664
205	0,000	235	0,000
206	9,888	236	0,000
207	2,524	237	0,000
208	4,238	238	0,000
209	0,000	239	7,816
210	0,000	240	10,642
TOTAL	134,637	TOTAL	41,227

ANEXO B

Valores da Evaporação

Tabela 12 – Evaporação registrada do dia 1 – 90

Tempo (dia)	Evaporação (mm)	Tempo (dia)	Evaporação (mm)	Tempo (dia)	Evaporação (mm)
01	0,685	31	0,746	61	1,776
02	0,685	32	0,746	62	1,776
03	0,685	33	0,596	63	1,776
04	0,951	34	0,596	64	1,776
05	0,951	35	0,596	65	1,776
06	0,685	36	0,596	66	1,776
07	0,685	37	0,596	67	2,200
08	0,685	38	1,044	68	2,200
09	0,685	39	1,044	69	2,200
10	0,720	40	1,044	70	2,200
11	0,720	41	1,044	71	2,200
12	0,720	42	1,351	72	2,200
13	0,720	43	1,351	73	0,683
14	0,720	44	1,351	74	0,683
15	0,720	45	1,351	75	0,683
16	1,186	46	1,351	76	0,683
17	1,186	47	1,351	77	0,683
18	1,186	48	1,351	78	0,683
19	0,685	49	0,611	79	0,683
20	0,685	50	0,611	80	0,555
21	0,685	51	0,611	81	0,555
22	0,685	52	0,611	82	0,555
23	0,685	53	0,611	83	0,555
24	0,685	54	0,737	84	0,555
25	0,685	55	0,737	85	0,555
26	0,685	56	0,737	86	0,555
27	0,746	57	0,737	87	0,721
28	0,746	58	0,737	88	0,721
29	0,746	59	0,737	89	0,721
30	0,746	60	1,776	90	0,721
TOTAL	23,039	TOTAL	27,358	TOTAL	35,406

Tabela 13 – Evaporação registrada do dia 91-180

Tempo (dia)	Evaporação (mm)	Tempo (dia)	Evaporação (mm)	Tempo (dia)	Evaporação (mm)
91	0,612	121	1,021	151	1,193
92	0,612	122	1,021	152	1,193
93	0,612	123	1,021	153	1,193
94	0,612	124	1,021	154	1,193
95	0,612	125	0,990	155	1,193
96	0,612	126	0,990	156	1,193
97	0,677	127	0,990	157	1,193
98	0,677	128	0,990	158	1,193
99	0,677	129	0,796	159	1,193
100	0,677	130	0,796	160	1,525
101	0,677	131	0,796	161	1,525
102	0,677	132	1,114	162	1,525
103	0,677	133	1,114	163	1,525
104	0,734	134	1,114	164	1,525
105	0,734	135	1,114	165	1,525
106	0,734	136	0,548	166	0,851
107	0,734	137	0,548	167	0,851
108	0,734	138	0,548	168	0,851
109	0,734	139	0,548	169	0,851
110	0,734	140	0,548	170	0,851
111	1,047	141	0,548	171	0,648
112	1,047	142	0,548	172	0,648
113	1,047	143	3,016	173	0,648
114	1,047	144	3,016	174	0,840
115	2,180	145	3,016	175	0,840
116	2,180	146	1,805	176	0,840
117	2,180	147	1,805	177	0,840
118	1,021	148	1,805	178	0,840
119	1,021	149	1,805	179	0,840
120	1,021	150	1,805	180	0,840
TOTAL	27,340	TOTAL	36,797	TOTAL	31,966

Tabela 14 – Evaporação registrada do dia 181-240

Tempo (dia)	Evaporação (mm)	Tempo (dia)	Evaporação (mm)
181	0,765	211	0,557
182	0,765	212	0,557
183	0,765	213	0,557
184	0,765	214	0,557
185	0,765	215	0,992
186	0,765	216	0,992
187	0,765	217	0,992
188	0,765	218	0,992
189	0,765	219	0,992
190	0,765	220	0,992
191	0,920	221	0,992
192	0,920	222	0,992
193	0,920	223	0,992
194	0,920	224	0,992
195	0,920	225	1,135
196	0,920	226	1,135
197	0,920	227	1,135
198	0,788	228	1,135
199	0,788	229	1,135
200	0,788	230	1,135
201	0,788	231	1,135
202	0,788	232	1,135
203	0,788	233	1,135
204	0,788	234	0,876
205	0,788	235	0,876
206	0,557	236	0,876
207	0,557	237	0,876
208	0,557	238	0,876
209	0,557	239	0,876
210	0,557	240	0,876
TOTAL	23,179	TOTAL	28,495

ANEXO C

Produção Total de Líquidos Percolados

Tabela 15 - Produção de líquidos percolados durante o primeiro mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
01	0,09	0,09	0,50
02	0,04	0,05	0,24
03	0,01	0,01	0,32
04	0,08	0,07	0,29
05	0,12	0,15	3,05
06	0,00	0,01	4,35
07	0,00	0,00	1,29
08	0,00	0,00	0,65
09	0,00	0,00	0,68
10	0,00	0,03	2,48
11	0,00	0,02	2,87
12	0,11	0,09	1,81
13	0,18	0,10	0,96
14	0,20	0,07	0,76
15	0,10	0,05	0,50
16	23,20	23,70	25,20
17	23,00	19,10	24,25
18	7,22	6,12	8,32
19	4,15	4,62	4,70
20	2,43	2,53	3,17
21	1,25	1,55	1,81
22	0,70	1,20	1,77
23	1,98	2,16	2,25
24	0,85	1,48	1,48
25	0,64	1,30	1,20
26	0,63	1,50	1,20
27	0,48	1,13	0,88
28	0,43	1,13	1,01
29	0,38	0,90	0,80
30	0,29	0,80	0,80
TOTAL	67,96	69,96	99,59

Tabela 16 - Produção de líquidos percolados durante o segundo mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
31	0,28	0,70	0,65
32	0,39	1,04	0,96
33	0,24	0,53	0,52
34	0,21	0,63	0,72
35	0,16	0,36	0,44
36	0,18	0,74	0,76
37	0,18	0,44	0,46
38	0,09	0,39	0,67
39	4,49	0,77	0,99
40	6,62	4,00	7,00
41	3,90	3,30	3,95
42	1,30	1,20	1,80
43	1,28	1,38	1,62
44	20,00	20,00	20,00
45	28,50	31,60	36,20
46	23,00	23,10	22,70
47	11,25	7,70	8,15
48	5,20	5,20	6,70
49	4,55	4,15	4,00
50	4,95	4,80	5,05
51	5,70	5,70	5,70
52	2,18	1,34	1,78
53	1,73	2,08	1,58
54	1,47	1,68	1,41
55	1,10	1,41	1,21
56	1,17	1,39	1,18
57	1,25	1,70	1,65
58	1,35	2,48	2,10
59	0,96	1,15	1,08
60	0,82	0,85	0,80
TOTAL	134,50	131,81	141,83

Tabela 17 - Produção de líquidos percolados durante o terceiro mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
61	0,67	1,01	0,85
62	0,53	0,43	0,69
63	0,72	0,91	0,89
64	0,53	0,75	0,98
65	0,46	0,64	0,73
66	0,52	0,65	0,88
67	0,57	0,75	0,83
68	0,56	0,80	0,78
69	0,70	1,55	1,93
70	17,50	17,40	20,00
71	9,50	6,10	8,20
72	5,60	4,40	4,65
73	3,90	2,80	3,30
74	2,73	2,55	2,48
75	2,20	5,20	5,40
76	12,10	18,20	18,10
77	12,00	8,35	9,80
78	10,70	6,90	8,10
79	4,45	3,10	3,50
80	3,90	2,20	3,10
81	3,00	2,40	2,45
82	2,50	2,30	2,00
83	1,95	1,90	1,60
84	1,98	1,96	1,75
85	1,55	1,50	1,48
86	1,90	1,65	1,60
87	1,74	1,61	1,39
88	1,15	1,28	1,01
89	1,39	1,49	1,22
90	1,18	1,48	1,26
TOTAL	108,18	102,26	110,95

Tabela 18: Produção de líquidos percolados durante o quarto mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
91	0,89	1,02	0,79
92	1,16	1,41	1,08
93	0,70	0,77	0,69
94	1,01	1,38	0,98
95	0,76	0,89	0,71
96	0,79	1,19	0,78
97	0,78	0,86	0,72
98	0,87	1,07	0,72
99	0,75	0,89	0,69
100	0,76	0,85	0,59
101	0,69	0,93	0,68
102	0,65	0,78	0,56
103	0,42	0,84	0,49
104	0,62	0,93	0,61
105	0,50	0,70	0,49
106	0,48	0,63	0,44
107	0,45	0,58	0,43
108	0,46	0,60	0,45
109	0,40	0,59	0,43
110	0,43	0,64	0,53
111	0,41	0,50	0,45
112	0,50	0,40	0,40
113	0,35	0,32	0,32
114	0,48	0,55	0,55
115	0,44	0,51	0,51
116	0,35	0,48	0,43
117	4,92	5,20	7,40
118	8,49	4,90	8,00
119	5,30	2,50	4,10
120	4,30	8,90	9,10
TOTAL	39,11	41,81	44,12

Tabela 19: Produção de líquidos percolados durante o quinto mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
121	4,30	7,80	9,70
122	20,70	21,20	22,30
123	12,10	8,20	9,20
124	6,50	4,50	5,10
125	3,95	3,70	3,65
126	4,65	7,40	6,45
127	3,80	2,60	3,70
128	4,30	2,90	3,10
129	2,70	1,80	1,70
130	3,20	1,50	2,10
131	2,50	1,90	1,65
132	1,80	1,65	1,25
133	1,95	1,12	1,20
134	1,63	4,92	6,50
135	19,90	20,70	22,50
136	8,15	9,76	11,28
137	5,03	2,75	6,11
138	4,14	4,02	6,10
139	2,38	1,96	4,38
140	10,10	2,20	18,70
141	16,02	15,08	19,02
142	37,12	34,20	35,07
143	23,03	26,70	22,74
144	12,62	11,85	10,18
145	7,52	6,18	4,46
146	5,70	4,81	4,08
147	5,04	4,39	3,29
148	4,24	4,05	2,56
149	3,50	5,70	9,02
150	47,50	47,50	47,50
TOTAL	286,07	273,04	304,59

Tabela 20: Produção de líquidos percolados durante o sexto mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
151	21,65	24,70	22,35
152	15,50	10,15	9,20
153	11,35	8,95	6,75
154	4,85	3,85	2,85
155	3,95	3,70	2,70
156	5,96	5,63	4,10
157	3,45	3,20	2,10
158	3,40	2,95	2,45
159	2,95	3,10	2,40
160	2,98	4,56	5,10
161	42,30	45,50	40,50
162	32,50	22,40	14,70
163	20,70	15,90	8,90
164	7,45	6,30	5,74
165	5,90	3,60	3,67
166	3,72	5,00	4,14
167	3,08	2,77	2,49
168	2,88	2,94	1,89
169	2,31	2,42	2,18
170	2,89	2,34	2,02
171	2,26	2,11	1,77
172	1,73	1,89	1,38
173	1,56	1,65	1,37
174	1,58	2,15	1,29
175	1,46	1,63	1,48
176	1,40	1,48	1,09
177	1,26	1,38	1,04
178	1,08	1,96	1,61
179	1,16	0,78	0,88
180	1,00	0,70	0,80
TOTAL	216,93	195,69	158,94

Tabela 21: Produção de líquidos percolados durante o sétimo mês de observação

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
181	1,71	2,44	0,45
182	2,11	2,49	1,51
183	21,59	10,02	22,78
184	18,10	15,38	12,65
185	8,20	7,45	6,70
186	4,20	4,35	4,15
187	2,35	2,50	1,20
188	2,10	1,95	1,50
189	2,30	2,10	1,90
190	3,10	2,25	2,35
191	2,50	2,42	2,53
192	1,95	1,82	1,85
193	1,30	1,65	1,60
194	1,50	1,72	1,85
195	1,25	0,95	0,83
196	1,95	1,82	1,60
197	2,60	2,50	2,93
198	3,10	2,95	3,20
199	1,25	0,85	0,94
200	4,00	3,95	2,90
201	28,50	25,70	26,50
202	19,70	18,90	19,50
203	12,60	12,90	12,73
204	9,90	8,70	11,20
205	6,90	2,08	4,90
206	5,60	2,00	4,35
207	5,48	2,51	4,01
208	9,80	8,70	9,90
209	8,70	6,80	7,60
210	5,52	3,61	4,36
TOTAL	199,86	163,46	180,47

Tabela 22: Produção de líquidos percolados durante o oitavo mês de observação.

Tempo (dia)	Célula 01 (litros/dia)	Célula 02 (litros/dia)	Célula 03 (litros/dia)
211	5,46	3,52	3,12
212	2,71	1,98	2,49
213	3,82	3,51	3,08
214	2,19	3,70	2,08
215	2,36	4,20	1,72
216	2,12	3,91	2,17
217	1,52	3,00	1,32
218	1,24	2,48	1,29
219	1,76	1,01	1,00
220	1,30	1,55	1,26
221	1,31	1,54	1,14
222	1,09	1,31	1,10
223	0,95	0,86	0,93
224	0,82	0,95	0,70
225	0,55	0,61	0,60
226	0,53	0,73	0,75
227	0,63	0,95	0,98
228	0,93	0,79	0,85
229	1,25	0,85	0,94
230	1,30	1,10	1,15
231	1,25	1,45	1,20
232	1,12	1,20	1,15
233	1,10	1,20	1,30
234	3,90	4,20	4,10
235	2,50	3,10	3,95
236	7,15	6,83	5,90
237	8,10	5,10	4,80
238	0,82	0,65	0,93
239	1,99	1,60	1,65
240	7,41	2,09	6,69
TOTAL	69,18	65,97	60,34

ANEXO D

Valores dos Recalques Acumulados

Tabela 23 – Recalques registrados do dia 1- 30

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
01	9,0	9,5	9,0
02	14,0	13,5	14,0
03	17,0	16,5	17,0
04	18,0	17,5	18,0
05	20,0	18,5	21,0
06	20,0	19,5	22,0
07	21,0	21,5	24,0
08	22,0	22,0	25,0
09	22,0	23,5	26,0
10	22,0	23,5	26,0
11	23,0	23,5	26,0
12	23,0	23,5	27,0
13	23,0	23,5	27,0
14	24,0	24,5	27,0
15	24,0	24,5	27,0
16	24,0	24,5	27,0
17	25,0	24,5	27,0
18	25,0	24,5	28,0
19	27,0	26,5	28,0
20	27,0	26,5	28,0
21	27,0	26,5	29,0
22	28,0	27,5	29,0
23	28,0	27,5	29,0
24	28,0	28,5	30,0
25	28,0	28,5	30,0
26	28,0	28,5	30,0
27	28,5	29,0	30,0
28	29,0	29,0	31,0
29	29,0	29,5	31,0
30	29,0	29,5	31,0

Tabela 24 – Recalques registrados do dia 31-60

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
31	29,0	30,5	31,0
32	30,0	30,5	31,0
33	30,0	30,5	31,5
34	30,0	30,5	31,5
35	30,0	30,5	31,5
36	30,0	30,5	31,5
37	30,0	30,5	31,5
38	30,0	30,5	31,5
39	30,0	30,5	31,5
40	30,0	30,5	31,5
41	30,0	30,5	31,5
42	30,0	30,5	31,5
43	30,0	31,0	31,5
44	30,0	31,0	32,0
45	30,5	31,0	32,0
46	30,5	31,0	32,0
47	30,5	31,0	32,0
48	30,5	31,0	32,0
49	30,5	31,5	32,0
50	30,5	31,5	32,5
51	30,5	31,5	32,5
52	30,5	31,5	32,5
53	30,5	31,5	32,5
54	30,5	31,5	32,5
55	30,5	31,5	32,5
56	31,0	32,0	33,0
57	31,0	32,0	33,0
58	31,0	32,0	33,0
59	31,0	32,0	33,0
60	31,5	32,0	33,0

Tabela 25 – Recalques registrados do dia 61-90

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
61	31,5	32,5	33,5
62	31,5	32,5	33,5
63	31,5	32,5	33,5
64	32,0	32,5	33,5
65	32,0	33,0	34,0
66	32,0	33,0	34,0
67	32,0	33,0	34,0
68	32,5	33,0	34,0
69	32,5	33,0	34,0
70	32,5	33,0	34,5
71	32,5	33,5	34,5
72	33,0	33,5	34,5
73	33,0	33,5	34,5
74	33,0	33,5	34,5
75	33,0	33,5	34,5
76	33,5	33,5	35,0
77	33,5	34,0	35,0
78	33,5	34,0	35,0
79	33,5	34,0	35,0
80	34,0	34,0	35,0
81	34,0	34,5	35,5
82	34,0	34,5	35,5
83	34,0	34,5	35,5
84	34,0	34,5	35,5
85	34,5	34,5	36,0
86	34,5	35,0	36,0
87	34,5	35,0	36,0
88	34,5	35,0	36,0
89	34,5	35,0	36,0
90	34,5	35,0	36,0

Tabela 26 – Recalques registrados do dia 91 -
120

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
91	34,5	35,0	36,0
92	34,5	35,0	36,5
93	35,0	35,5	36,5
94	35,0	35,5	36,5
95	35,0	35,5	36,5
96	35,0	35,5	36,5
97	35,0	35,5	36,5
98	35,0	35,5	36,5
99	35,0	35,5	37,0
100	35,0	35,5	37,0
101	35,0	35,5	37,0
102	35,0	35,5	37,0
103	35,0	35,5	37,0
104	35,5	36,0	37,0
105	35,5	36,0	37,0
106	35,5	36,0	37,0
107	35,5	36,0	37,0
108	35,5	36,0	37,0
109	35,5	36,0	37,0
110	35,5	36,0	37,0
111	35,5	36,0	37,0
112	35,5	36,5	37,5
113	35,5	36,5	37,5
114	35,5	36,5	37,5
115	35,5	36,5	37,5
116	36,0	36,5	37,5
117	36,0	36,5	37,5
118	36,0	36,5	37,5
119	36,0	36,5	37,5
120	36,0	36,5	37,5

Tabela 27 – Recalques registrados do dia 121-
150

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
121	36	36,5	37,5
122	36,5	36,5	37,5
123	36,5	36,5	37,5
124	36,5	36,5	37,5
125	36,5	37	37,5
126	36,5	37	38
127	36,5	37	38
128	36,5	37	38
129	36,5	37	38
130	37	37,5	38
131	37	37,5	38
132	37	37,5	38
133	37	37,5	38,5
134	37,5	37,5	38,5
135	37,5	37,5	38,5
136	38	37,5	38,5
137	38	38	38,5
138	38	38	38,5
139	38	38	38,5
140	38	38	38,5
141	38	38	38,5
142	38	38	38,5
143	38	38	39
144	38	38	39
145	38	38	39
146	38	38	39
147	38	38	39
148	38	38	39
149	38	38,5	39
150	38	38,5	39

Tabela 28 – Recalques registrados do dia 151-
180

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
151	38	38,5	39
152	38	38,5	39
153	38,5	38,5	39
154	38,5	38,5	39,5
155	38,5	38,5	39,5
156	38,5	38,5	39,5
157	38,5	38,5	39,5
158	39	38,5	39,5
159	39	38,5	39,5
160	39	38,5	39,5
161	39	38,5	39,5
162	39,5	39	39,5
163	39,5	39	39,5
164	39,5	39	39,5
165	39,5	39	39,5
166	39,5	39	39,5
167	40	39	40
168	40	39,5	40
169	40	39,5	40
170	40	39,5	40
171	40	40	40,5
172	40	40	40,5
173	40	40	40,5
174	40	40	40,5
175	40	40	40,5
176	40	40,5	40,5
177	40	40,5	40,5
178	41	40,5	40,5
179	41	40,5	41
180	41	40,5	41

Tabela 29 – Recalques registrados do dia 181-210

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
181	41	40,5	41
182	41	40,5	41
183	41	40,5	41
184	41	40,5	41
185	41	40,5	41
186	41	40,5	41
187	41	40,5	41
188	41	40,5	41
189	41	40,5	41
190	41	40,5	41
191	41	40,5	41
192	41	40,5	41
193	41	40,5	41
194	41	40,5	41
195	41	40,5	41
196	41,5	41	41,5
197	41,5	41	41,5
198	41,5	41	41,5
199	41,5	41	41,5
200	41,5	41	41,5
201	41,5	41	41,5
202	41,5	41	41,5
203	41,5	41	41,5
204	41,5	41	41,5
205	41,5	41	41,5
206	41,5	42	41,5
207	42	42	42,5
208	42	42	42,5
209	42	42	42,5
210	42	42	42,5

Tabela 30 – Recalques registrados do dia 211-240

Tempo (dia)	Célula 01 (cm)	Célula 02 (cm)	Célula 03 (cm)
211	42	42	42,5
212	42	42	42,5
213	42	42	42,5
214	42	42	42,5
215	42	42	42,5
216	42	42	42,5
217	42,5	42,5	43
218	42,5	42,5	43
219	42,5	42,5	43
220	42,5	42,5	43
221	42,5	42,5	43
222	42,5	42,5	43
223	42,5	42,5	43
224	42,5	42,5	43
225	42,5	42,5	43
226	42,5	42,5	43
227	42,5	42,5	43
228	42,5	42,5	43
229	42,5	42,5	43
230	42,5	42,5	43
231	43	43	43,5
232	43	43	43,5
233	43	43	43,5
234	43	43	43,5
235	43	43	43,5
236	43	43	43,5
237	43	43	43,5
238	43	43	43,5
239	43	43	43,5
240	43	43	43,5