

IPEN/GRR-REL-01/19

CATEGORIA DISTRIB: A

# **Caracterização geológica de sítios para um repositório profundo de rejeitos radioativos**

**Raphael Ramos da Costa Fioranelli Vieira**

**Roberto Vicente**

**RELATÓRIO TÉCNICO DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

Janeiro/2019

**Gerência de Rejeitos Radioativos  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo**

**GRR – Gerência de  
Rejeitos Radioativos**





IPEN/GRR-REL-01/19

CATEGORIA DISTRIB: A

# **Caracterização geológica de sítios para um repositório profundo de rejeitos radioativos**

**Raphael Ramos da Costa Fioranelli Vieira**

**Roberto Vicente**

**RELATÓRIO TÉCNICO DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

Janeiro/2019

**Gerência de Rejeitos Radioativos  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo**

**GRR – Gerência de  
Rejeitos Radioativos**



Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN  
Presidente: Paulo Roberto Pertusi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Ipen-Cnen/SP  
Superintendente: Wilson Aparecido Parejo Calvo

Gerência de Rejeitos Radioativos - GRR  
Gerente: Júlio Takehiro Marumo

A Gerência de Rejeitos Radioativos é o departamento do Ipen-Cnen/SP que tem como Missão promover a gestão segura dos rejeitos radioativos gerados no Brasil, dentro dos princípios éticos de proteção ao homem e ao meio ambiente. O objetivo da gestão dos rejeitos radioativos é assegurar um nível adequado de proteção à população e às gerações futuras e a preservação do meio ambiente, protegendo, além do Homem, as outras espécies e os recursos naturais.

A GRR presta serviços de gestão de rejeitos aos usuários de materiais radioativos das áreas industrial, médica e outras. Desenvolve atividades de pesquisa e desenvolvimento conduzidas no sentido de se aprimorar os métodos, as técnicas e as estratégias de gestão para reduzir os custos e melhorar a segurança no tratamento dos rejeitos. As atividades de P&D estão voltadas para as áreas de caracterização, tratamento e deposição final. Além disso, a GRR participa das atividades de ensino, formação e treinamento nas diversas áreas de aplicação da tecnologia nuclear.

O presente relatório técnico foi preparado para divulgar, da forma mais ampla possível, as informações contidas nos resultados das atividades de pesquisa e desenvolvimento da GRR, para a administração do Estado, para a comunidade acadêmica, e para o público em geral.

Comentários e sugestões sobre este ou outros relatórios da GRR são bem vindos e devem ser dirigidos a GRR – Ipen-Cnen/SP

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9745  
Junho/2016

Página do Ipen-Cnen/SP na Internet: <http://www.ipen.br>  
Página da CNEN na Internet: <http://www.cnen.gov.br>

Sugestão de referência deste relatório:

Fioranelli Vieira, R.R.C; Vicente, R. Caracterização geológica de sítios para um repositório profundo de rejeitos radioativos. Ipen-Cnen/SP, São Paulo, Janeiro de 2019. (IPEN/GRR-REL-01/19)

Palavras-chave: repository, site characterization, radioactive waste

NOTA: Nem o Ipen-Cnen/SP nem a GRR dão garantias, expressas ou implícitas, da exatidão, completeza ou utilidade de quaisquer informações, produtos ou processos descritos neste relatório, ou de que seu uso não infrinja direitos privados. A referência, neste relatório, de qualquer produto comercial, processo ou serviço pelo nome comercial, marca ou fabricante não constitui nem implica necessariamente a recomendação ou favorecimento pela GRR ou pelo Ipen-Cnen/SP. As conclusões e pontos de vista apresentados neste relatório são do autor.

Para cópias deste documento, contatar:

Biblioteca Terezine Arantes Ferraz  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9094  
[bibl@ipen.br](mailto:bibl@ipen.br)

Para contatos sobre o conteúdo:

Roberto Vicente  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
CEP 05508-000 – São Paulo, SP  
Fone: 11 3133-9758  
[rvicente@ipen.br](mailto:rvicente@ipen.br)

# **Caracterização geológica de sítios para um repositório profundo de rejeitos radioativos**

## **Resumo**

O presente trabalho tem como finalidade contribuir para o desenvolvimento de métodos, na Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN, para a caracterização de sítios de deposição de rejeitos radioativos, a partir de análises geográficas. O objetivo é levantar as informações das características de local para identificar se são adequadas à instalação de um repositório do tipo poço tubular profundo, destinado à deposição de fontes seladas em desuso (FRSD). Trata-se de um exercício para avaliar a viabilidade de instalação de um repositório, na área de localização das instalações do IPEN, segundo os requisitos da segurança para o homem e o meio ambiente, em curto e em longo prazo.

# **Geological characterization of sites for a deep repository of radioactive waste**

## **Abstract**

The purpose of this work is to contribute to the development of methods in the Radioactive Waste Management Department of IPEN, for the characterization of suitable sites for radioactive waste disposal, using geographic analysis. The objective is to collect information about the physical characteristics of a site to verify whether it is acceptable for the installation of a deep borehole for disused sealed radioactive sources (DSRS). It is an exercise on how to evaluate the geographic area of IPEN facilities to assess its acceptability for a borehole disposal facility, according to the safety requirements for protection of man and environment, now and in the future.



## SUMÁRIO

<b>1. Localização.....</b>	<b>pág. 05</b>
<b>2. Topografia.....</b>	<b>pág. 07</b>
<b>3. Geomorfologia.....</b>	<b>pág. 09</b>
<b>4. Embasamento Cristalino e Cobertura Pedológica.....</b>	<b>pág. 11</b>
<b>5. Pesquisas de Caracterização de solo e embasamento cristalino IAG.....</b>	<b>pág. 13</b>
<b>5.1. Poços Profundos</b>	
<b>5.2. Método Gravimétrico</b>	
<b>6. Caracterização do Embasamento Cristalino.....</b>	<b>pág. 18</b>
<b>7. Hidrografia.....</b>	<b>pág. 19</b>
<b>7.1. Bacia Hidrográfica do Rio Pinheiros</b>	
<b>7.1.1. Rio Pinheiros</b>	
<b>7.1.2. Subsistema do Canal Fluvial</b>	
<b>7.1.3. Subsistema da planície de inundação</b>	
<b>7.1.4. Subsistema dos terraços fluviais</b>	
<b>8. Caracterização do Repositório.....</b>	<b>pág. 22</b>
<b>8.1. Conceito do Repositório Destinado as Fontes Seladas em Desuso</b>	
<b>8.2. Configuração do sistema de depósito</b>	
<b>8.3. Características do Repositório</b>	
<b>8.4. Características dos Rejeitos Radioativos</b>	
<b>8.5. Características geológicas necessárias</b>	
<b>9. Conclusões.....</b>	<b>pág. 25</b>
<b>10. Referências.....</b>	<b>pág. 26</b>



## 1. Introdução

O objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade de instalação de um depósito final para rejeitos radioativos do tipo fonte radioativa selada em desuso (FRSD), na área onde se localizam as instalações da Gerência de Resíduos Radioativos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, na Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO). Trata-se de um exercício para desenvolver os métodos de caracterização de sítios de deposição.

O trabalho consiste em levantar informações referentes à geomorfologia da área e identificar as características do embasamento cristalino com o propósito de localizar e identificar, dentro do perímetro estudado, os pontos ideais para a instalação de um repositório do tipo tubular em grande profundidade.

As características do embasamento cristalino, tais como suas condições físicas, devem atender aos requisitos básicos necessários à instalação desse modelo de repositório, que tem como função o isolamento dos radionuclídeos depositados, de acordo com as especificações técnicas do modelo de repositório desenvolvido pelo GRR-IPEN.

Os parâmetros gerais de eficiência e segurança a serem considerados seguem como referência as especificações adotadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), e estão relacionadas com o regulamento CNEN NE 6.06 sobre seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos.<sup>10</sup>

A partir de tais referências, a hipótese de que a área escolhida para a pesquisa possui características geomorfológicas e geológicas adequadas à instalação de um repositório será avaliada. Esta pesquisa visa caracterizar o local e verificar a viabilidade da área potencial à instalação do repositório.

## 2. Materiais e métodos

A caracterização do sítio foi feita por meio da colheita de informações, mapas, resultados de estudos geofísicos e demais dados em bancos de dados e na bibliografia disponível, por meio de busca na Internet e bibliotecas da USP.

## 3. Resultados

### 3.1 Localização

A área estudada está localizada na zona oeste da cidade de São Paulo, no bairro do Butantã, e compreende o perímetro da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO) que sedia a Universidade de São Paulo, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e a Gerência de Resíduos Radioativos (GRR). A GRR abriga atualmente um depósito intermediário de rejeitos radioativos. Ele está localizado nas coordenadas **23° 34'01"S** e **46° 44'06"W** em uma altitude estimada de 785m e serve a este estudo como um modelo para se estudar a possibilidade de instalação do repositório.

O perímetro regional considerado corresponde à área da sub-bacia hidrográfica do Rio Pinheiros em seu trecho delimitado entre os afluentes, córrego do Jaguaré, a oeste, e rio Pirajuçara, a leste, estando os pontos de afluição localizados na porção norte do perímetro analisado, delimitado a sul pela Avenida Corifeu de Azevedo Marques, em paralelo a Avenida Lineu Prestes, identificada como sendo a cota máxima da vertente e que compõe grande parte da área total considerada nesta pesquisa.

A GRR está localizada em uma região de alta vertente convexa na porção sul da cidade universitária e suas cotas máximas atingem entre 780m e 800m e tem como linha limite a Avenida Doutor Lineu Prestes que assume a característica de divisor de águas em relação ao escoamento pluvial superficial. As figuras 1 e 2 apresentam a área estudada, com indicação da localização da GRR.



Figura 1. Mapa da CUASO e localização do IPEN e da GRR <sup>1</sup>.

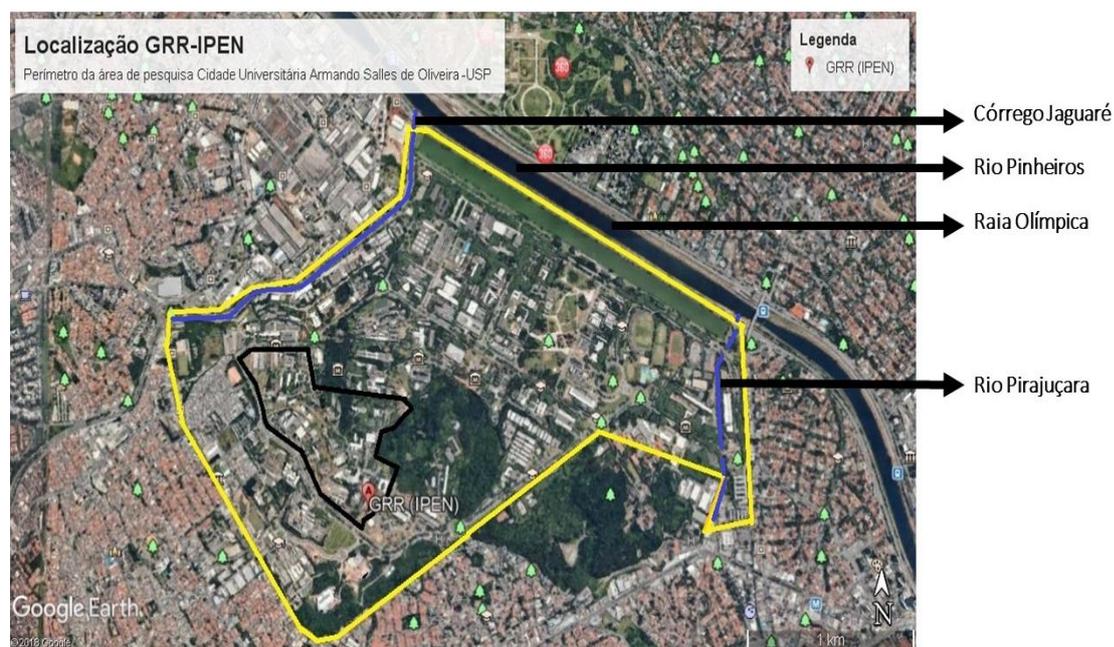
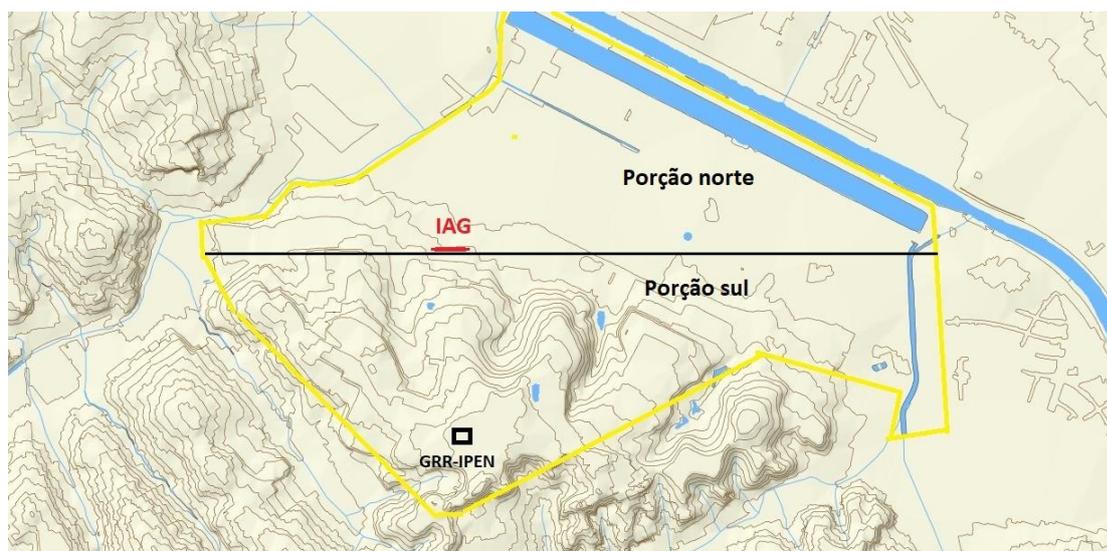


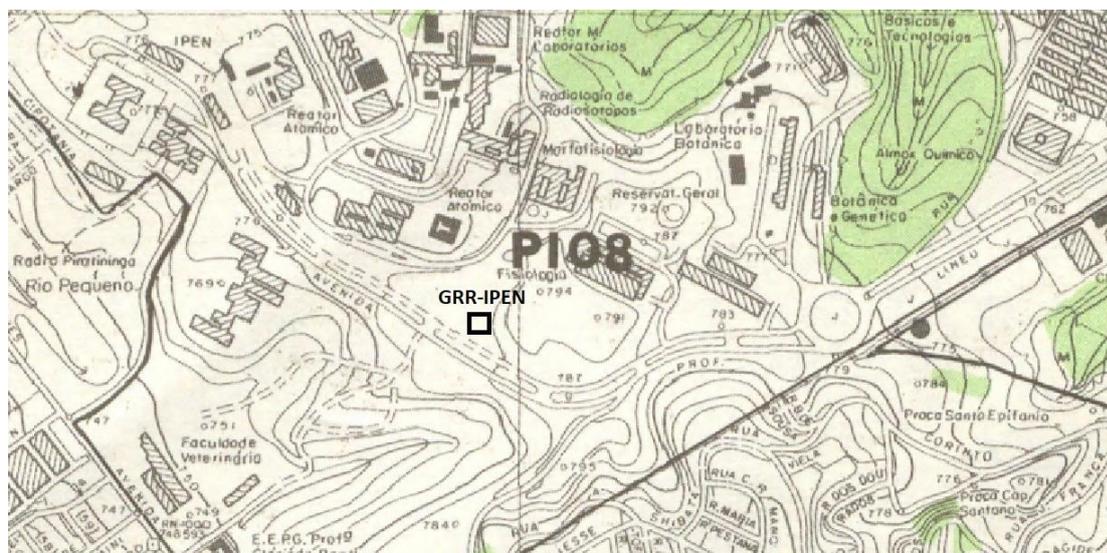
Figura 2. Perímetros da CUASO, do IPEN e da GRR e rios Pinheiros, córrego do Jaguaré e rio Pirajuçara <sup>2</sup>.

### 3.2 Topografia

Com o propósito de melhor descrever a topografia da área estudada podemos subdividir o perímetro total em duas regiões, uma referente à planície fluvial que corresponde à porção norte da área, que se estende desde a raia olímpica da CUASO até a raia rasa das instalações do Instituto de Astrofísica e Geofísica (IAG), na Rua do Matão, e a porção sul, caracterizada pela elevação das cotas altimétricas e que corresponde a uma área típica de vertente que se estende até a Avenida Doutor Lineu Prestes onde se inicia rebaixamento altimétrico em direção à Avenida Corifeu de Azevedo Marques, ao sul do perímetro da CUASO. O mapa da área está nas figuras 3 e 4.



**Figura 3.** Ponto referencial GRR-IPEN representado sobre mapa topográfico local, localizado entre as cotas 780m e 800m. Escala 1: 25000 cm. <sup>3</sup>



**Figura 4.** Ponto referencial do GRR-IPEN entre cotas mais elevadas de 780m a 800m da vertente da CUASO (Adaptado de <sup>3</sup>).

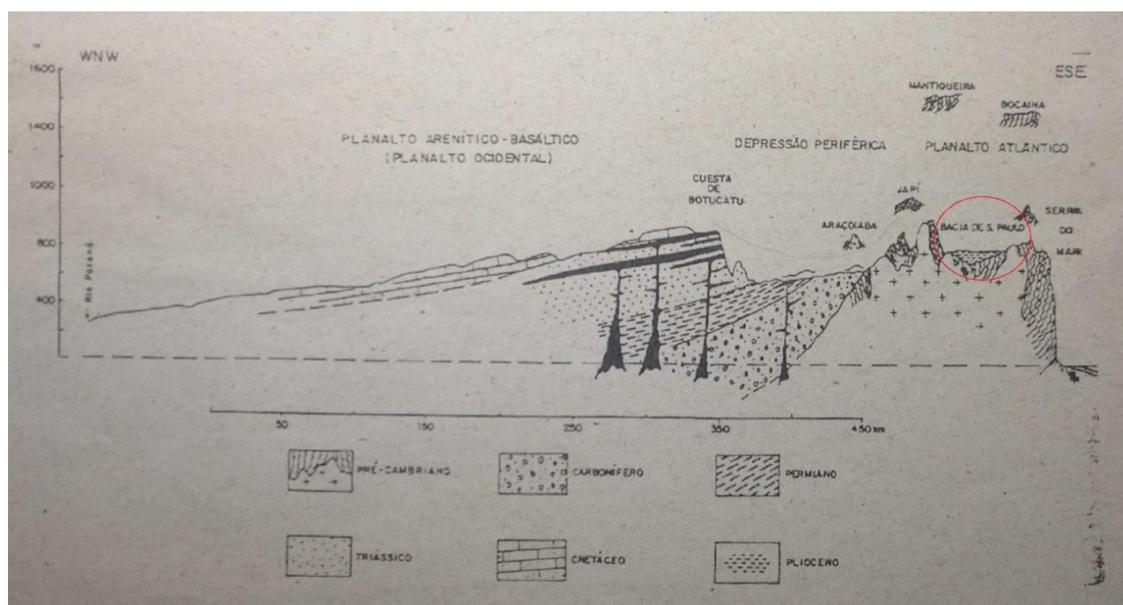
A porção sul da área estudada está quase toda na área de vertente, que representa cerca de metade da área da CUASO, sendo que o perímetro do IPEN está totalmente nesta

região. A porção norte abrange a planície fluvial do rio Pinheiros, caracterizada por predomínio de depósitos sedimentares.

Considerando o conjunto das duas regiões as cotas variam desde os 720m referentes à planície fluvial do rio Pinheiros que se estende até a Rua do Matão, marcada pela localização do IAG e a raia rasa desse instituto, de onde se observa o aumento de altitude na vertente que atinge sua cota máxima aos 800m na proximidade do centro de Gerencia de Resíduos Radioativos localizado a uma altitude estimada de 785m.

### 3.3 Geomorfologia

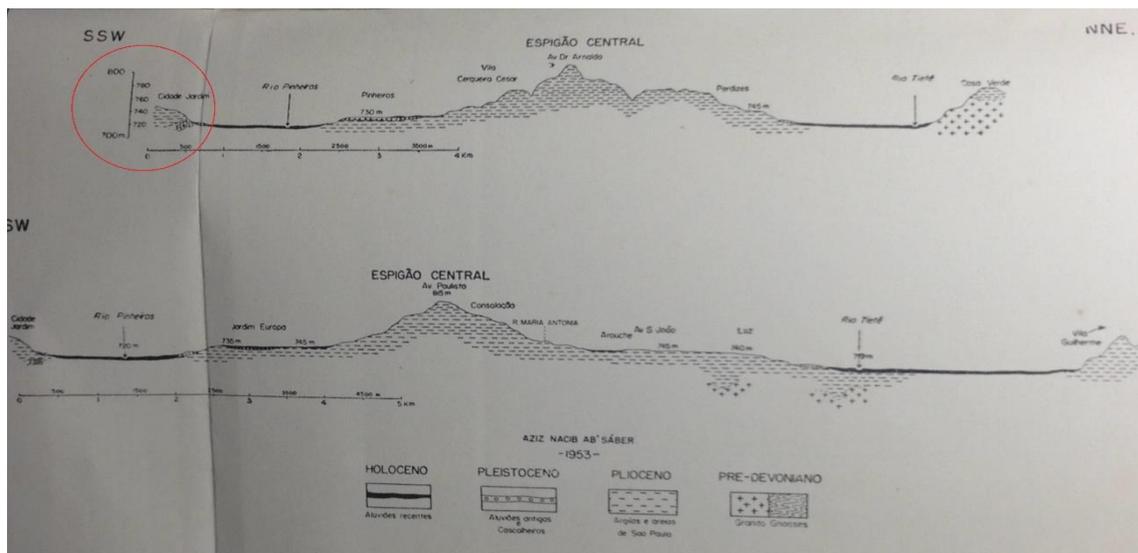
A área de estudo está localizada no âmbito do Cinturão Orogenético do Atlântico, caracterizado por relevos sustentados por litologias metamórficas associadas com rochas intrusivas e caracterizado pelo domínio de mares de morros constituídos por formas de topos convexos, elevada densidade de canais de drenagem e vales profundos dentro da unidade morfológica do Planalto Paulistano/Alto Tietê, mais precisamente na Bacia Sedimentar de São Paulo, caracterizada pelas formações sedimentares das formações São Paulo e Resende que se sobrepõem ao embasamento cristalino na região. A figura 5 é o perfil geomorfológico da região.



**Figura 5.** Perfil geomorfológico do estado de São Paulo, sentido oeste-leste, com destaque para Bacia de São Paulo a leste (localização da Cidade de São Paulo) circulado em vermelho.

A área localizada sobre os sedimentos das formações São Paulo e Resende é constituída predominantemente por sedimentos areno-argilosos de idade terciária, sobrepostos ao embasamento cristalino granito-gnáissico pré-cambriano, apresentando diferentes graus de intemperismo.

Segundo os dados identificados nas investigações de campo pelo IAG e pelo Instituto de Geociências (IG), o grau de desgaste da rocha do embasamento devido ao intemperismo está concentrado nos 4 metros iniciais, a partir de sua interface com a cobertura sedimentar das formações São Paulo e Resende.



**Figura 6.** Perfil geomorfológico (sentido SSW-NNE) da Cidade de São Paulo com destaque, circulado em vermelho, para a região da Cidade Jardim localizada na zona oeste, e composta por unidades de idade pré-devoniana, caracterizada por formações do tipo granito-gnaisse. <sup>4</sup>

A área da CUASO está localizada na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo sobre embasamento constituído de rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, de idade pré-cambriana, com preenchimento ocorrido desde o Paleógeno até o Quaternário, correspondendo a sedimentos de leques aluviais, planície aluvial e lacustre e depósitos fluviais meandrantas, aluviais e coluviais.

O embasamento cristalino aflora em alguns pontos da CUASO e pertence ao Complexo Embu, composto por filitos, xistos, migmatitos, gnaisses migmatizados e corpos lenticulares de quartzitos, anfíbolitos e rochas cálcio-silicatadas, e às Suítes Graníticas Indiferenciadas, formadas por granitos de origem sintectônica a pós-tectônica. Por serem materiais mais resistentes ao intemperismo e à erosão, servem de altos morfológicos na bacia, onde as maiores altitudes encontram-se sobre os afloramentos da Formação Resende.

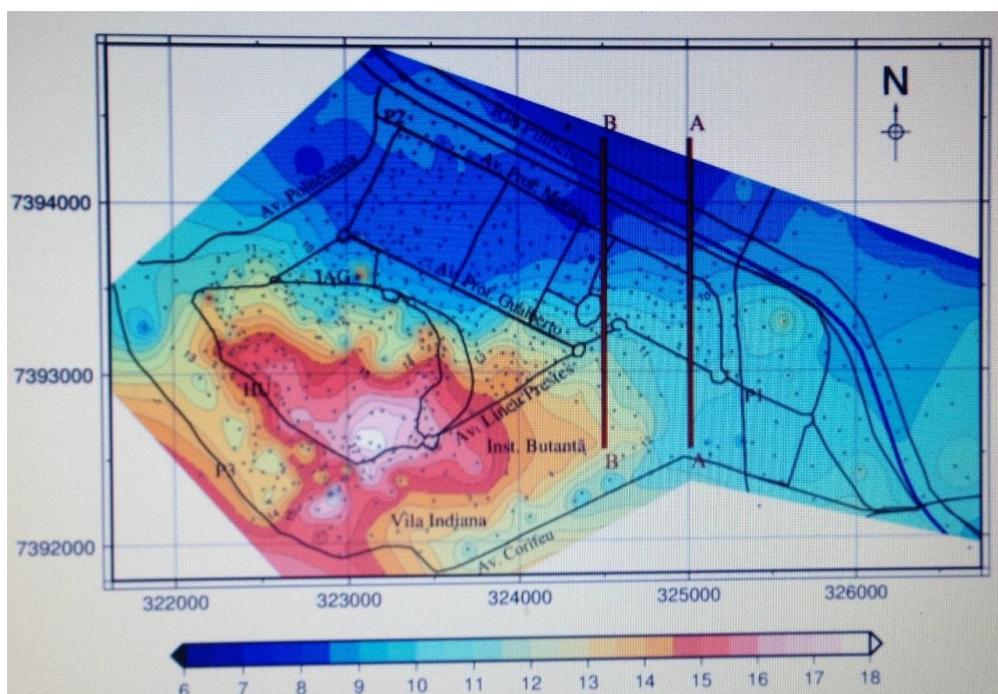
### 3.4 Embasamento Cristalino e Cobertura Pedológica

Os estudos de campo <sup>5, 6</sup> sobre identificação e caracterização do embasamento cristalino e da cobertura pedológica da área trazem informações que ajudam a identificar melhor a litologia da área e a caracterizar a estrutura e condições do embasamento cristalino que é o foco a ser compreendido para que se possa estabelecer a adequação da área para instalação de um repositório de rejeitos.

A caracterização do embasamento cristalino que forma o assoalho da área de estudo segue o método dos trabalhos de investigação geofísica, executada por meio de ensaios de sísmica rasa (reflexão e refração), eletrorresistividade (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) e 'Ground Penetrating Radar' (GPR). Esses ensaios obtiveram uma excelente concordância na integração de seus resultados o que permitiu elaborar um modelo geológico-geofísico para determinados pontos da área estudada. Assim, foi possível caracterizar o perfil pedológico e litológico destes pontos e, dessa forma, identificar tanto a

localização como as características do embasamento cristalino e sua cobertura pedológica que formam o conjunto da área estudada.

O trabalho do IG identifica, a partir de análise de anomalias gravimétricas, a localização e dimensão potencial de áreas (bolsões) de maciços rochosos do tipo granito-gnaisses de média a grandes dimensões no relevo que caracteriza a área de estudo. O trabalho do IAG, a partir de sondagens batimétricas e sismológicas, identifica a localização e a profundidade da interface dos maciços rochosos referentes ao embasamento em relação à cobertura pedológica, além do estado de sanidade das formações rochosas do embasamento quanto ao seu grau de intemperismo, porosidade relacionada a fraturamento rochoso, níveis de saturação e composição mineralógica do embasamento. A figura 7 mostra um mapa da área.



**Figura 7.** Mapa de anomalias gravimétricas ao ar livre da CUASO, com o destaque em vermelho representando os maiores índices de densidades apresentados pelas formações que compõem o substrato da área. (Adaptado de <sup>5</sup>).

A área estudada, na Bacia Sedimentar de São Paulo, que integra o Rift Continental do Sudeste do Brasil, foi foco de vários estudos desde a década de 1990 (Iritani; Iritani et al; Taioli), os quais obtiveram resultados que indicam que o pacote sedimentar da área é constituído predominantemente por sedimentos areno-argilosos de idade terciária das formações Resende e São Paulo. Apresenta espaçamento em direção ao Rio Pinheiros, atingindo espessuras de até 70m de profundidade próximo ao curso do rio enquanto que na porção sul e sudeste do campus, próxima à vertente onde está localizado o IPEN, ocorre um afinamento da espessura da cobertura sedimentar que se sobrepõe ao embasamento cristalino identificado como sendo granito-gnáissico de idade pré-cambriana e que sofre uma inflexão em direção a área de maior espessura sedimentar nas proximidades do curso do Rio Pinheiros, mergulhando no sentido NW com profundidades que variam de 35 metros, em sua parte mais rasa, a em torno de 55 metros na mais profunda. Apresenta diferentes

graus de intemperismo e áreas de fraturas com uma espessura de 4 m a partir do topo da formação rochosa cristalina, em sua interface com a cobertura sedimentar.

Foram identificados três tipos de unidades geológico-geofísicas na área estudada, sendo elas: 1) aterro, caracterizado por argila arenosa e siltosa com níveis intercalados de silte, ora argiloso, ora arenoso de cor escura predominante e com eventual presença de matéria orgânica; sedimentos da Bacia de São Paulo, constituídos por horizontes argilosos e arenosos intercalados entre si e que podem ser subdivididos em 2) superior e 3) inferior e que estão relacionados respectivamente com as formações São Paulo e Resende.

### 3.5 Pesquisas de caracterização de solo e embasamento cristalino

O mapeamento geotécnico <sup>6</sup> para caracterização do solo e do embasamento cristalino da área da cidade universitária foi feito por meio perfuração e perfilagem de poços profundos na raia rasa do IAG e por meio de mapeamento gravimétrico. Foram feitos com o propósito de identificar a cobertura pedológica e a profundidade em que se encontra o embasamento cristalino.

#### 3.5.1 Poços profundos

A área utilizada para os testes de campo e perfilagem dos poços profundos foi identificada como situada na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, o que indica que a vertente referente à área física do IPEN possui embasamento cristalino com menor cobertura pedológica sedimentar em comparação à área referente à planície fluvial do rio Pinheiros, sendo que tais resultados, em conjunto com as análises feitas por meio do método de análise gravimétrica que identificou bolsões de maior adensamento de anomalias gravimétricas junto à área de vertente, indicam maior concentração de formações rochosas distribuídas próximas à superfície na porção sul da cidade universitária.

Na figura 8 estão indicados os locais onde foram feitas as perfurações e nas figuras 9 a 11 se mostra o perfil de cada um dos três poços identificados.

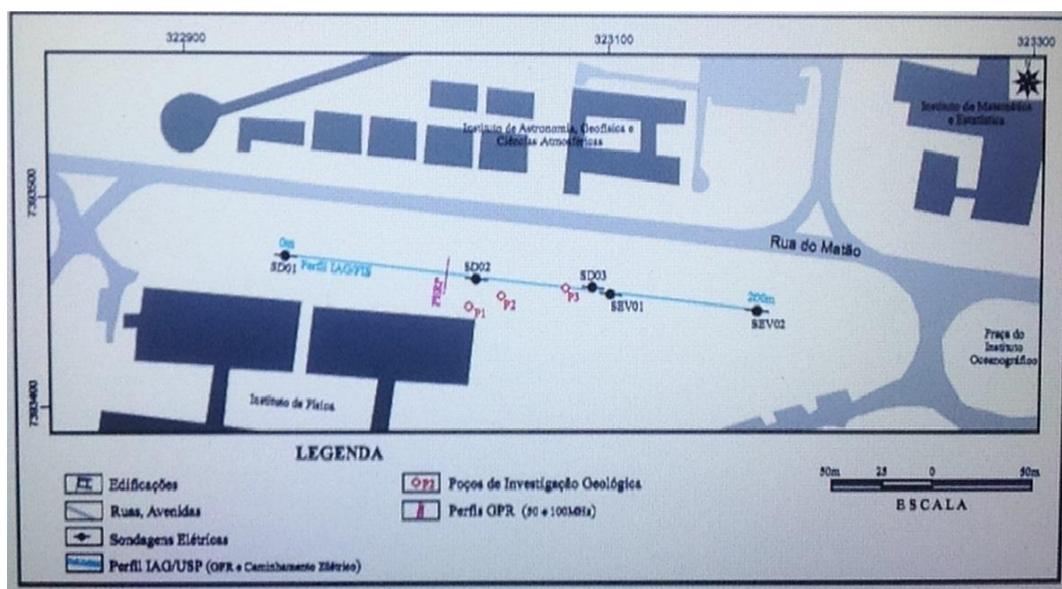


Figura 8. Localização dos poços 1, 2 e 3 de investigação geológica do IAG.

# POÇO P1

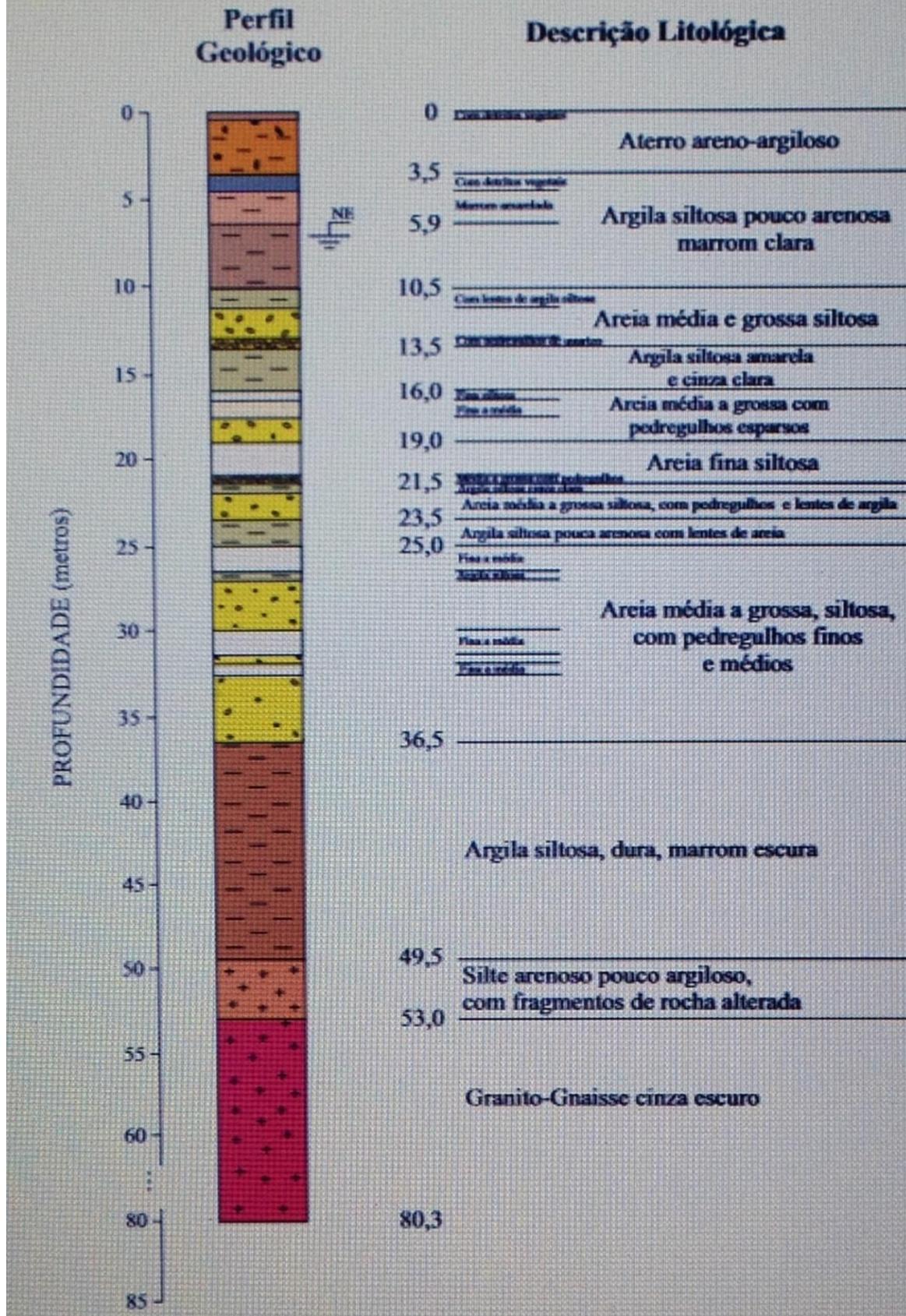


Figura 9. Perfil litológico obtido no poço P1, com profundidade de 80,3 m.

# POÇO P2

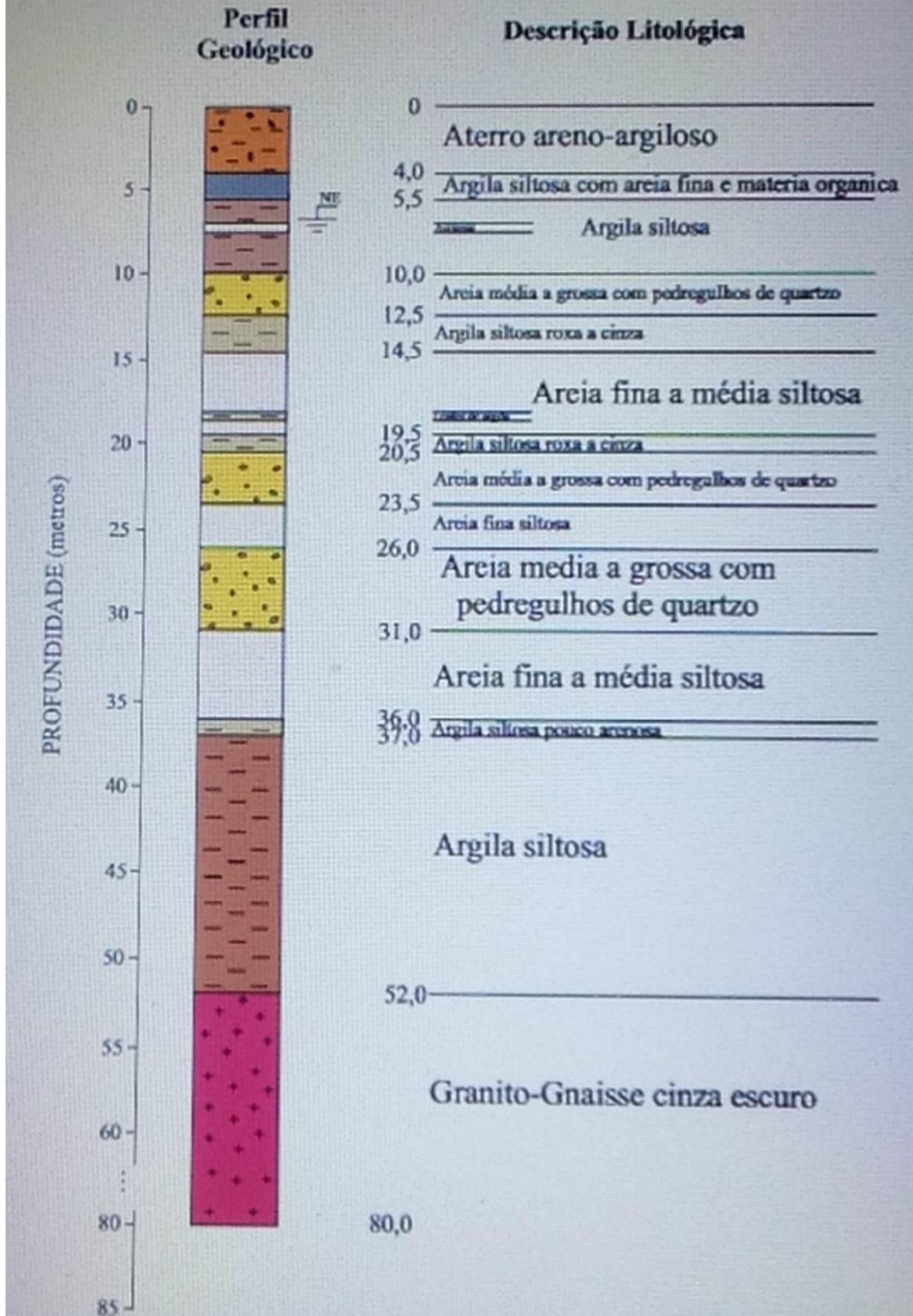
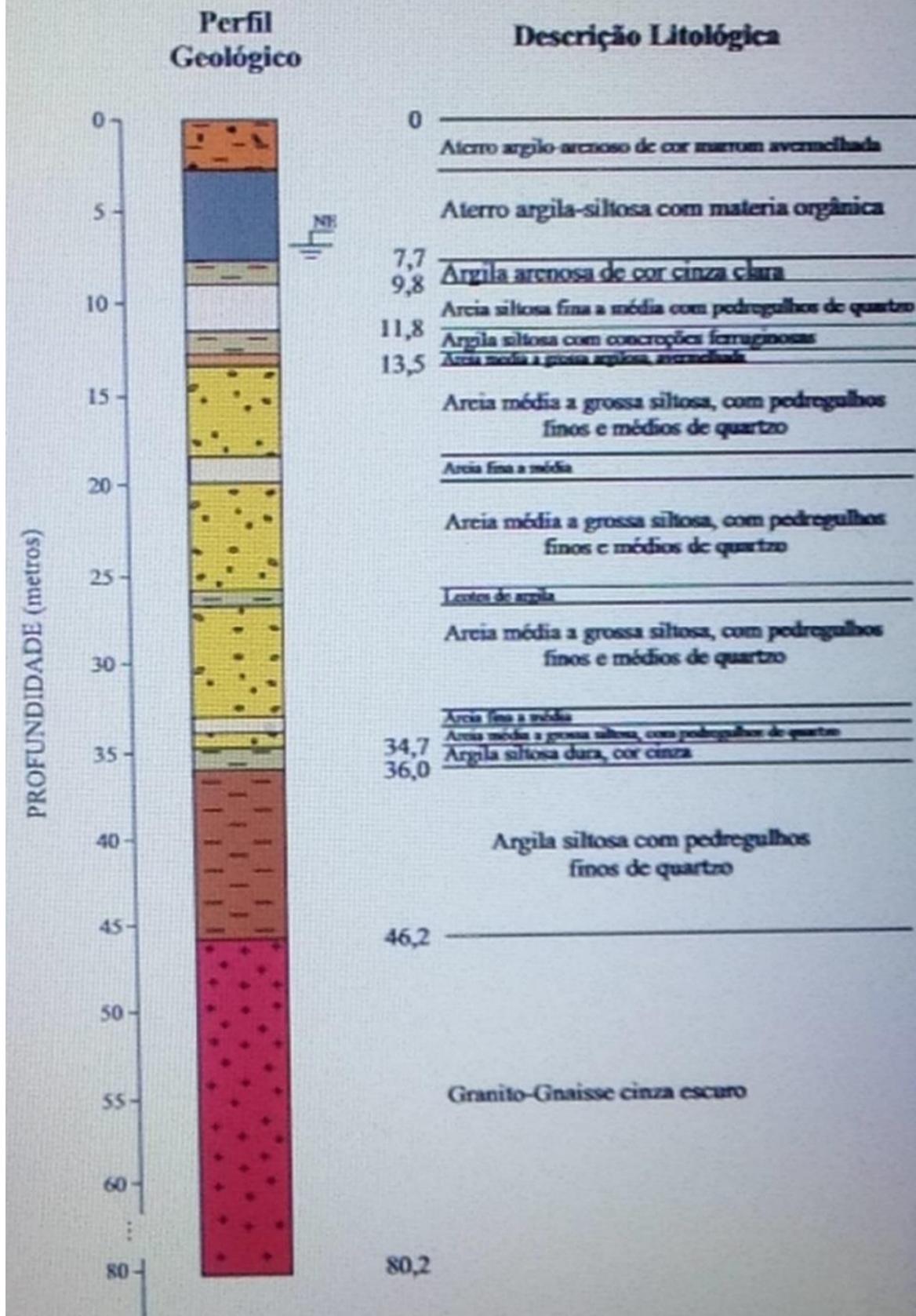


Figura 10. Perfil litológico obtido no poço P2, com profundidade de 80,0 m.

# POÇO P3



Figuras 11. Perfil litológico obtido no poço P2, com profundidade de 80,2 m.

### 3.5.2. Método Gravimétrico

Foi aplicado o método que consiste em identificar, a partir da análise de anomalias de gravimetria, a densidade das formações rochosas e identificar sua localização, distribuição, densidade e tipo de rocha dos maciços que constituem o embasamento da área.

O método gravimétrico para a investigação do interior da Terra baseia-se nas medições e interpretação das variações do campo gravitacional terrestre resultante das diferenças de densidade entre as diversas rochas localizadas na superfície e subsuperfície terrestres.

Às variações do campo ou aceleração da gravidade dá-se o nome de anomalia gravimétrica ( $\Delta g$ ). Utiliza-se o termo ao corpo causador da anomalia, à estrutura ou à formação geológica que produz a anomalia gravimétrica, permitindo dessa forma compreender o grau de compensação isostática das massas topográficas e inferir como a massa distribui-se dentro da litosfera. Pequenas mudanças no valor da aceleração da gravidade refletem as variações laterais de densidade que estão diretamente relacionadas à litologia e as estruturas na região pesquisada.

A tabela 1 contém os intervalos de variação da densidade de alguns tipos materiais geológicos e na figura 12 se apresenta os resultados das medições gravimétricas realizadas na CUASO.

Tabela 1 - Intervalos de variação da densidade relacionados com alguns tipos de material geológico.

Material Geológico	Intervalo de densidade ( $\text{kgm}^{-3}$ )
Aluvião (úmido)	1960-2000
Argila	1630-2600
Folhelho	2060-2660
Arenito	2050-2550
Calcário	2600-2800
Halita	2100-2400
Granito	2520-2750
Basalto	2700-3200
Gabro	2850-3120
Quartzito	2600-2700
Gnaisse	2610-2990



Figura 12. Resultados das medições gravimétricas na Cidade Universitária.

Segundo os valores obtidos pelo método gravimétrico em 2D no perfil analisado, os valores demonstraram uma densidade rochosa entre 2.600  $\text{kg/m}^3$  e 2670  $\text{kg/m}^3$  que caracterizam o embasamento cristalino da área estudada o que conclui ser composto por rocha do tipo granítica.

### 3.6 Caracterização do Embasamento Cristalino:

Segundo os estudos de campo <sup>5,6</sup> executados na cidade universitária, o embasamento cristalino da área é constituído por migmatitos com estrutura predominante acamada, sendo os testemunhos descritos como granito-gnaise, com profundidade entre 46 m e 53 m em relação à cobertura sedimentar argilosa e arenosa das formações Resende e São Paulo, em ordem de deposição cronológica, até o topo do embasamento. A figura 13 contém um exemplo dessa rocha.

A Parte superior do embasamento com uma espessura média de 4m apresenta muita alteração e fraturas, sendo que abaixo desta camada a rocha se apresenta praticamente sã, coerente e pouco fraturada, apresentando em geral menos de cinco fraturas por metro, com intercalações de rocha medianamente alterada e fraturada (entre cinco e dez fraturas por metro), associadas a níveis em que as fraturas apresentam as paredes alteradas e com película de oxidação, sendo, que até a profundidade de 34m em relação ao maciço rochoso, é possível reconhecer algumas descontinuidades sub-horizontais.



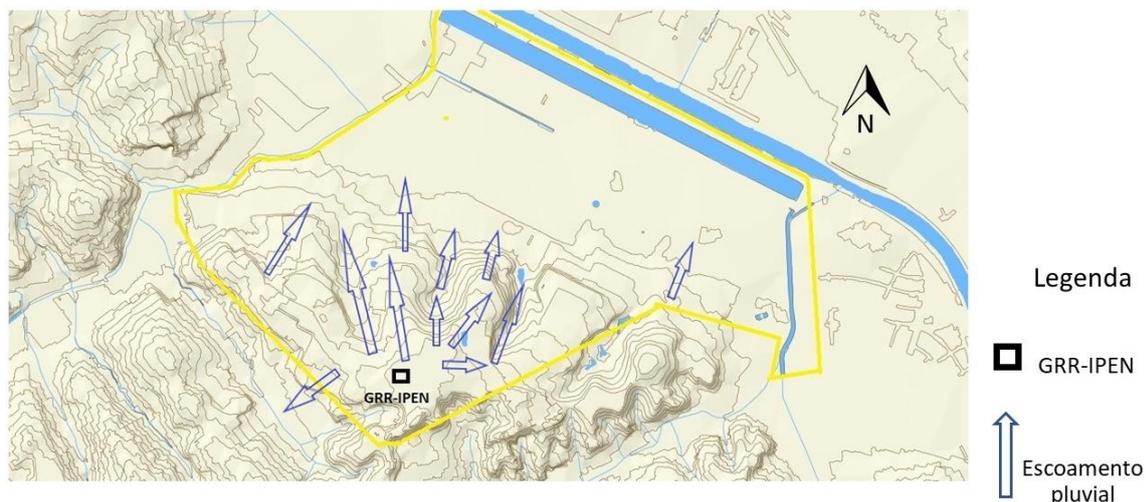
**Figura 13.** Exemplo de gnaise migmatito, rocha metamórfica, constituída por quartzo feldspato potássico plagioclase, *produzida pela injeção do magma granítico entre as lâminas da formação xistosa.*

### 3.7 Hidrografia

O ponto de localização das instalações da GRR nas proximidades da cota mais alta, na área de interflúvio, proporciona um fator positivo no que diz respeito à segurança de um repositório devido ao escoamento superficial das águas pluviais se dirigirem para a região da planície fluvial, assim como seu distanciamento favorável em relação planície tenderia a manter um nível freático abaixo da linha freática limite da vertente.

A Planície Fluvial do Rio Pinheiros formada por baixos terraços fluviais e planície de inundação apresenta fatores que comprometeriam a instalação de um repositório em pontos

localizados nesta porção da área estudada, sendo que o escoamento das águas superficiais provindas das cotas mais altas da vertente constitui agravante ao potencial de acúmulo hídrico na área de planície, aumentando desta forma a criticidade dessa localidade no que diz respeito ao comprometimento da segurança do repositório e necessidade de adoção de barreiras artificiais adicionais para além das previstas pelo modelo de repositório proposto. No mapa da figura 14 estão indicadas as linhas de escoamento.



**Figura 14.** Sentido do escoamento superficial das águas pluviais na área de Cidade Universitária (Adaptado de <sup>2</sup>).

19

### 3.7.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pinheiros

#### a) Rio Pinheiros:

O rio Pinheiros é um curso de água localizado na cidade de São Paulo com uma extensão estimada de 25 quilômetros.

Informações principais e dados hidrográficos<sup>7</sup>:

- Região Hidrográfica: Região do rio Paraná.
- Bacia hidrográfica que pertence: Bacia Hidrográfica do rio Tietê.
- Sub-bacia: Bacia Hidrográfica do rio Pinheiros.
- Nascente: confluência entre os rios Guarapiranga e Grande.
- Foz: rio Tietê
- Principais afluentes: rio Pirajuçara e córregos Jaguaré, Verde, Uberaba, Sapateiro e Água Espraiada.
- Vazão média: 10 mil litros por segundo.

A porção da bacia estudada está compreendida pela planície fluvial do rio Pinheiros no trecho entre o rio Pirajuçara (Este) e o córrego Jaguaré (Oeste) que é caracterizado com base nos três subsistemas fluviais típicos de um sistema meândrico:

## b) Subsistema do canal fluvial

É composto por canal ativo onde o fluxo de água é mais rápido, meandros ou canais abandonados das curvas meândricas, e barras de acreção lateral, ambientes de deposição compostas por sedimentos grosseiros, principalmente areias.

## c) Subsistema da planície de inundação

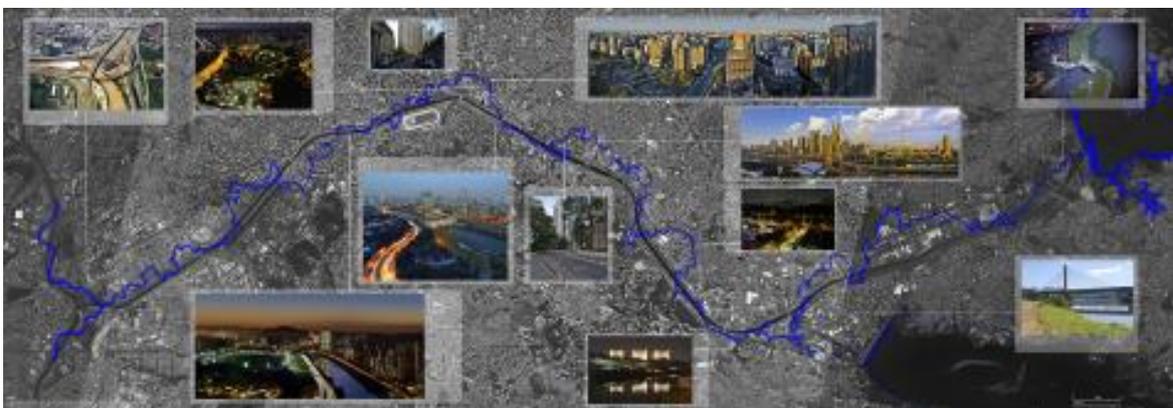
Corresponde ao leito maior, que é regularmente ocupado pelas cheias e em sua maior parte é formada por sedimentos grossos advindos da movimentação lateral do canal fluvial coberto por sedimentos finos advindos da carga suspensas das águas de cheia, e apresenta as seguintes unidades morfológicas:

- Cordões marginais convexos ou arco meândrico: saliências e depressões nas margens convexas das curvaturas meândricas formadas à medida que o canal fluvial migra lateralmente em direção à margem côncava, devido ao depósito lateral de sedimentos.
- Diques marginais: cristas ou saliências formadas acima da superfície da planície de inundação e adjacentes ao canal fluvial, geralmente contendo material de maior granulometria depositado durante as fases de transbordamento.
- Bacias de inundação: terrenos baixos localizados entre os diques marginais e os terraços ou vertentes, onde predominam depósitos de sedimentos finos.
- Diques de rompimento: depósitos formados durante as cheias a partir do rompimento dos diques marginais.

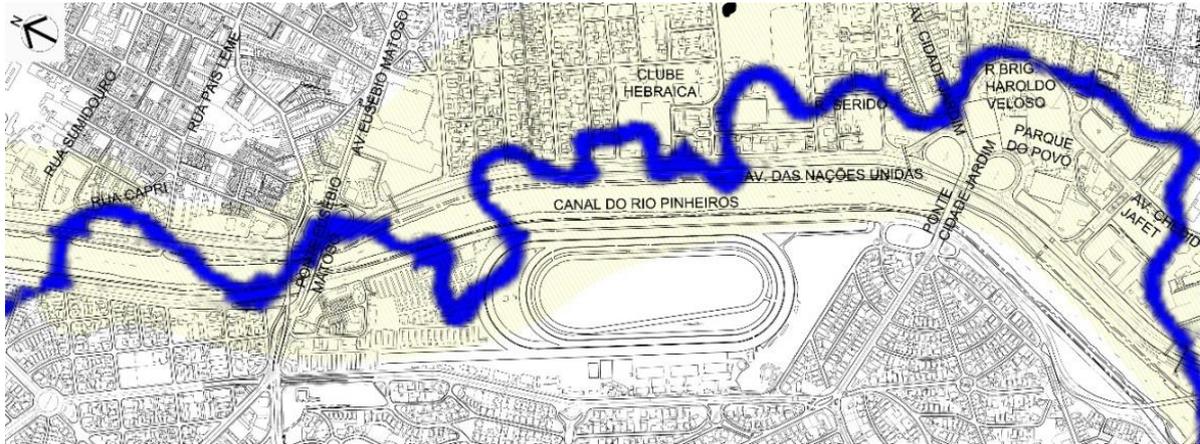
## d) Subsistema dos terraços fluviais:

Constituem planos horizontais ou sub-horizontais topograficamente mais altos que a planície de inundação, que as águas de inundação raramente alcançam. Pode ser definido como antigas planícies de inundação que foram abandonadas, sendo composto então pelos materiais sedimentares típicos destas planícies.

Há duas explicações sobre a sinuosidade do canal do Rio Pinheiros: reflexo do tipo de carga sedimentar e consequência de movimentos tectônicos e controles litológicos já que a área possui um contexto tectônico de importância regional. Nas figuras 15 e 16 são mostrados os meandros sobrepostos ao mapa com o curso atual do rio.



**Figura 15** - Projeções do curso natural do Rio Pinheiros em relação ao curso atual após o seu sistema de canalização na cidade de São Paulo. <sup>8</sup>



**Figura 16.** Projeções do curso natural do Rio Pinheiros em relação ao curso atual após o seu sistema de canalização na cidade de São Paulo. <sup>8</sup>

## 4. Caracterização do Repositório

### 4.1 Conceito do Repositório

O conceito de repositório foi desenvolvido pelo IPEN entre os anos de 1999 e 2002 com o propósito de proporcionar uma alternativa de deposição para fontes radioativas seladas em desuso. O inventário de rejeitos radioativos em território nacional conta um total estimado de cerca de 273.000 fontes radioativas em desuso, dentre as quais fontes de Radio-226 utilizadas em braquiterapia desde o início do século XX, fontes de Amerício-241 retiradas de para-raios radioativos e detectores de fumaça de uso industrial e residencial, e fontes com outros 20 radionuclídeos de uso médico, industrial e de pesquisa. Essas fontes estão armazenadas em depósitos intermediários da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sendo que o maior deles é o do IPEN.

Em um prazo de menos de uma década, o Brasil deve tomar as decisões que levem à solução do problema de deposição das fontes seladas que ainda permanecem armazenadas de forma intermediária, sem definição sobre o confinamento definitivo. Esse é um problema relacionado com o destino final de grande parte do inventário de rejeitos radioativos de meia vida longa produzidos e armazenados no Brasil. É papel da CNEN estabelecer uma política de maior responsabilidade no que diz respeito à forma como nossa sociedade encara seus compromissos em relação aos rejeitos radioativos. Esses compromissos estão relacionados com os aspectos de atenção à saúde, de preservação do ambiente e de organização econômica e social e que fazem parte do desenvolvimento de uma sociedade inserida no contexto histórico no qual o uso da tecnologia nuclear está presente na cadeia produtiva de diversos bens e serviços necessários à manutenção do desenvolvimento social, econômico e tecnológico da sociedade brasileira.

Portanto, ao se fechar o ciclo de vida das fontes radioativas seladas, utilizadas pelas diversas áreas que compõem a economia nacional e presentes em nosso cotidiano mesmo que de forma discreta, se está contribuindo para o uso da tecnologia nuclear e se está estabelecendo as bases de uma sociedade mais ética e responsável em relação às consequências futuras das atividades das quais tiramos proveito no presente.

### 4.2 Configuração do sistema de depósito

O sistema de depósito consiste em um poço tubular com aproximadamente 400 metros de profundidade, perfurado no interior de um batólito granítico, caracterizado por formação

rochosa com dimensões suficientes para abrigar o repositório, que apresente baixa permeabilidade à água, e que esteja abaixo do manto de desgaste intempérico e das zonas de fraturamento, a partir da sua interface com a cobertura pedológica do local.

O poço é subdividido em duas zonas relacionadas à profundidade: a superior, denominada Zona de Isolamento, que se inicia na superfície, atravessando toda a cobertura pedológica e o manto de desgaste do batólito, até atingir a zona inferior em que a rocha são, em condições físicas e químicas intactas, desempenhará o papel de Zona de Confinamento dos rejeitos radioativos.

O poço é revestido com um tubo de aço inoxidável com 20 centímetros de diâmetro interno, que desempenha a função de câmara do repositório. Nessa câmara serão depositadas as fontes, acondicionadas em recipientes com estanqueidade para retardar o quanto possível o ingresso de água durante o tempo em que as fontes perdem sua periculosidade pelo próprio decaimento radioativo. Esse tempo pode se estender por muitos milênios para o caso das fontes de Ra-226 e de Am-241. O chumbo foi escolhido como material do recipiente por causa da sua inércia química e para servir de blindagem à radiação. O espaço entre o tubo de aço inoxidável e a formação geológica é preenchido com pasta ou argamassa de cimento, que dá estabilidade estrutural ao poço e funciona como uma barreira complementar ao ingresso de água e à saída dos radionuclídeos.

As tecnologias de perfuração, revestimento e cimentação do poço são as convencionais usadas em projetos de exploração de água subterrânea ou extração de petróleo e gás.

### **4.3 Características do Repositório**

O conjunto de barreiras artificiais impede ou retarda a migração dos radionuclídeos depositados para a biosfera junto com a barreira natural do meio geológico escolhido. Os materiais utilizados na construção suportam os efeitos térmicos resultantes da hidratação do cimento durante a cimentação do poço, possíveis reações químicas entre os materiais que compõem as barreiras artificiais e o meio geológico, e o calor gerado pelo decaimento radioativo das fontes. Além disso, esses materiais são resistentes à degradação radiolítica que poderia diminuir a capacidade de retenção dos radionuclídeos no interior do repositório, impedindo-os de entrar em contato com o meio ambiente.

As barreiras artificiais, em conjunto com o meio físico, devem impedir a penetração de águas subterrâneas na câmara do repositório. Portanto, o revestimento de aço inoxidável, a cimentação do poço e a escolha de um batólito granítico que não apresente zonas de fratura que permitam circulação de água, são qualidades fundamentais do repositório profundo.

### **4.4 Características dos Rejeitos Radioativos**

Os rejeitos radioativos, aos quais se destina o modelo do repositório descrito, compreendem as fontes radioativas seladas descartadas ao fim da vida útil, chamadas de fontes radioativas seladas em desuso (FRSD). Essas fontes têm, de modo geral, características construtivas que contribuem, também, para o isolamento das substâncias radioativas. A maioria delas é constituída de uma cápsula de aço inoxidável, com dimensões de poucos centímetros, fechada por solda, dentro da qual está o material radioativo. Elas têm, portanto, estabilidade estrutural e térmica, durabilidade química e resistência à corrosão e à degradação por microrganismos, incombustibilidade, ausência de líquidos, agentes quelantes ou materiais explosivos, corrosivos ou tóxicos. Uma parte das fontes é constituída

do material radioativo aderido à superfície do metal da fonte, ao invés de encapsulado, mas apresenta, também, essas qualidades por causa da segurança requerida durante o uso.

#### **4.5 Requisitos para o meio geológico**

O modelo de repositório foi concebido de forma a atender o padrão de segurança estabelecido pelos órgãos internacionais em relação à deposição final dos rejeitos radioativos. Portanto, a geologia da área onde se pretende instalar o repositório deve apresentar, no mínimo, as condições necessárias para confinar os rejeitos e impedir a dispersão dos radionuclídeos no meio ambiente e sua entrada na cadeia alimentar da região.

O meio geológico da área candidata à instalação do repositório deve ter características litológicas que permitam a perfuração de um poço tubular com as dimensões necessárias ao confinamento seguro do volume total de rejeitos a serem depositados, além de permitir o estabelecimento de uma zona de segurança em volta do repositório. O corpo rochoso, que desempenha o papel de barreira natural entre os rejeitos e o ecossistema, deve ter, também, propriedades que assegurem estabilidade química e física, baixa susceptibilidade a deformações, resistência à ruptura, baixa permeabilidade à água, baixa solubilidade, homogeneidade, baixo valor econômico e baixa susceptibilidade a degradação pela ação dos rejeitos depositados ou pelas barreiras artificiais que compõem o corpo físico do repositório.

O substrato mais adequado à instalação do repositório profundo são as rochas cristalinas, de preferência de composição granítica devido a sua baixa permeabilidade, excetuando suas zonas de fraturas que devem ser evitadas no processo de escolha de sítio adequado, e que contenha bem pouca ou nenhuma circulação de águas subterrâneas.

O granito é física e quimicamente estável, ocorre em formações com dimensões em escala adequada e de forma homogênea, e possuem baixo valor econômico, na profundidade escolhida para o repositório.

24

### **5. Discussão**

A cidade universitária Armando Salles de Oliveira está localizada sobre um embasamento cristalino do tipo granito-gnaiss considerada o tipo de formação rochosa adequada à instalação de um depósito final de rejeitos radioativos do tipo fonte selada em desuso. O embasamento cristalino se encontra encoberto por sedimentos terciários típicos de bacia fluvial que apresentam granulometria classificada predominantemente como argilosa e siltsosa decorrentes de deposição fluvial.

A área que se estende desde os limites da raia rasa do Instituto de Astronomia e Geofísica até o curso do rio Pinheiros, localizado ao norte da área do campus universitário, é definida como planície de inundação e caracterizada como sendo a área de maior vulnerabilidade em relação à segurança e garantia de contenção dos radionuclídeos no interior de um repositório.

A área onde está a Gerência de Resíduos Radioativos do IPEN, localizado na região de alta vertente da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira, apresenta um perfil adequado para a instalação de um repositório do tipo tubular profundo, pois está fora da área de inundação e apresentaria menor potencial para o acúmulo de águas pluviais que comprometeriam a segurança e eficiência do repositório. Além disso, apresenta menor

cobertura sedimentar sujeita a processos de erosão, assim como a maior proximidade do embasamento cristalino em relação à superfície.

A existência de rochas do tipo granito-gnaiss compoendo a estrutura do embasamento cristalino verificada pelas sondagens dos poços profundos na raia rasa do IAG, assim como a maior concentração de densidade gravimétrica, com índices semelhantes aos identificados em formações graníticas localizadas sobre a área de alta vertente, indica maior possibilidade dessa área ser composta por batólitos. Há indícios de que essa formação apresenta dimensões suficientes à instalação de um repositório no modelo proposto e conforme as especificações caracterizadas em seu projeto.

Em relação às condições de intemperismo das rochas que compõem o embasamento cristalino, há de se definir as dimensões reais dos batólitos, tanto em profundidade quanto em extensão e identificar quais apresentam o menor desgaste das rochas localizadas na região de alta vertente, assim como as zonas de menor fratura, sabendo-se que o embasamento identificado sob a raia rasa do IAG apresenta um manto de intemperismo e zona de fraturas com profundidade estimada em 4 metros a partir da interface da rocha com a cobertura pedológica. A partir dessa profundidade, a rocha sã apresenta condições de baixo desgaste por intemperismo e decréscimo de zonas com alto índice de fraturas, características litológicas estas fundamentais para a viabilidade de instalação de um repositório em uma formação geológica em profundidade.

## 6. Conclusão

Este é um trabalho em curso, cuja finalidade é desenvolver os métodos de caracterização de local para fins de escolha de sítios adequados à instalação de um repositório tipo poço tubular profundo destinado à deposição de fontes radioativas seladas em desuso. A parte do trabalho que está apresentada neste relatório foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica.

A área usada como modelo para o desenvolvimento dos métodos é aquela em que está o IPEN e as áreas vizinhas dentro da Cidade Universitária e seu entorno.

Os próximos trabalhos terão como objetivo identificar os métodos geofísicos que completem a caracterização de locais no processo de escolha de sítios adequados ao repositório, identificar os fornecedores nacionais de serviços que empreguem esses métodos, a estimativa de preços e prazos de execução e a elaboração dos modelos de especificação desses serviços para fins de contratação.

## 7. Referências

1. Universidade de São Paulo, Superintendência do Espaço Físico. **Plano Diretor da Cidade Armando Salles de Oliveira**, 2013.
2. Google Earth, Google, disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>
3. Geosampa ,disponível em: [http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/\\_SBC.aspx](http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx)
4. AB'SABER, AZIZ NACIB, BERNARDES NILO - **Vallée du Paraíba, Serra da Mantiqueira et Région de São Paulo**, XVIII ème Congres International de Géographie, Rio de Janeiro, 1956.
5. MARANGONI, REGINA YÁRA; MOURA, DENISE SILVA; FERREIRA, HERBERT - **Mapas de anomalias gravimétricas da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira – USP/SP**, Revista do Instituto de

Geociências – USP, v.17,n.2,p.227-268, São Paulo 2017, Disponível em [www.igc.usp.br/geologiausp](http://www.igc.usp.br/geologiausp) - 257

6. PORSANI, JORGE LUÍS; RODRIGUES BORGES, WELINTOM; ELIS,VAGNER ROBERTO; DIOGO,LILIANA ALCAZAR; YUKIO HIODO, FRANCISCO; MARRANO,ANTONIO e BIRELI,CARLOS ALBERTO– **Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP** , Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, 2004.

7. ALVES DA LUZ, RODRIGO - **Geomorfologia da Planície Fluvial do Rio Pinheiros entre os Bairros de Pinheiros, Butantã e Cidade Jardim**, Universidade de São Paulo FFLCH Departamento de Geografia, Programa de Pós Graduação em Geografia Física, São Paulo 2010.

8. 10ª Bienal de Arquitetura de São Paulo, 2013. Disponível em <https://riopinheiros.wordpress.com/onde-passava-o-rio-pinheiros/>

9. Technical Report of the Technical Cooperation Project IEAE BRA9058: **Supporting Technologies for Treatment and Disposal of Radioactive Wastes Borehole Disposal of Radioactive Wastes Borehole Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources** – Volume II – Attachments, Gerência de Rejeitos Radioativos – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, dezembro de 2015.

10. Norma CNEN – NE 6.06 - Resolução CNEN 014/89. Janeiro / 1990 – **Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos.**