

FERNANDO ARTURO ERAZO LOZANO

SELEÇÃO DE LOCAIS PARA BARRAGENS DE REJEITOS USANDO O  
MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

São Paulo

2006

FERNANDO ARTURO ERAZO LOZANO

SELEÇÃO DE LOCAIS PARA BARRAGENS DE REJEITOS USANDO O  
MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Geotécnica

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov

São Paulo

2006

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

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Erazo Lozano, Fernando Arturo**

**Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica / Fernando Arturo Erazo Lozano. – São Paulo, 2006.**

**128 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.**

**1. Barragens de rejeitos 2. Tomada de decisão 3. Impactos ambientais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações II. t.**

*Dedicat3ria*

*A Claudia, apoyo incondicional, amor y fortaleza en todo momento.*

*A nuestro futuro, semilla que se form3 y esta nasciendo, creciendo.*

*A mis Padres con todo amor.*

*A toda mi familia.*

*Todo lo que he logrado hasta hoy es fruto de su dedicaci3n y a ellos pertenece.*

## AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov, pelo apoio neste meu retorno acadêmico, seus comentários motivadores e empenho em sua orientação.

Ao Prof. Dr. Celso Santos Carvalho, pelas sugestões precisas no exame de qualificação e pela participação no final da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha, pelos esclarecimentos no exame de qualificação.

À Companhia MINER S.A., aos engenheiros e geólogos, à parte técnica e aos trabalhadores, particularmente ao Dr. Guillermo Gaviria e ao Engenheiro Gabriel Ramirez Medina, pelo apoio fundamental na realização deste trabalho.

Aos Engenheiros Franklin Ortiz e Arturo Calle, pelo apoio na pesquisa ambiental.

À comunidade do Carmen de Atrato.

Aos meus amigos com quem tive o prazer de ter convivido: Alejandro, Martha, Arianna, Mauricio, Maria, Sol, Katherin, Lênin, e Magda, pela troca de apoio e força. Felicidade e sucesso para eles.

Aos meus colegas da sala 25 (Carlos, Marcio, Rafael, Alexei, Jorge, Raul, Arturo, Marcos), pela ajuda e colaboração em todos os momentos e por criar um ambiente agradável ao longo desses anos.

Ao pessoal da Biblioteca EPEC. À Sarah Ferreira, pela ajuda na revisão das referencias.

Novamente aos meus pais, Eduardo e Socorro, e meus irmãos, que de longe foram motivadores do meu trabalho. À minha grande família de Medellín, pela compreensão, apoio e constante incentivo. A Don Oscar, por deixar força em nossos corações.

À Claudia, mais uma vez, motivo dos meus esforços e luta.

À CAPES, pelo suporte financeiro ao final da pesquisa.

## RESUMO

Barragens de rejeitos são estruturas que têm a finalidade de reter os resíduos sólidos e água dos processos de beneficiamento de minério. Seu planejamento inicia com a procura do local para implantação, etapa na qual se deve vincular todo tipo de variáveis que direta ou indiretamente influenciam a obra: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos, entre outras. Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização do método de análise hierárquica como apoio na tomada de decisões para seleção de locais para barragens de rejeitos. A revisão bibliográfica de fatores que influem nesta etapa de decisão resultou em indicadores claros de avaliação, que foram orientadores para a coleta de dados no estudo de caso. O estudo de caso consistiu na avaliação de três locais para a localização da nova barragem de rejeitos de beneficiamento de cobre a ser construída pela MINER S.A. no município de Carmen de Atrato, na Colômbia. Para a seleção do local entre três alternativas, foram considerados dois aspectos: custo inicial total e impacto ambiental. Na aplicação do método de análise hierárquica, o objetivo principal da hierarquia proposta foi o menor impacto ambiental, considerando-se as três causas consideradas mais importantes: implantação da barragem, ruptura da barragem e transporte de rejeitos da usina ao local de disposição. Foram analisados os impactos potenciais na água, solo, fauna, flora e ocupação humana. Os custos foram tratados separadamente. No final foi realizada uma análise conjunta dos custos iniciais totais e dos resultados do método de análise hierárquica, para servir como apoio ao tomador de decisão. Foi também realizada uma análise de sensibilidade, que mostra a influência significativa de um dos critérios nos pesos finais dos locais avaliados.

Palavras chave: Barragem de rejeitos. Decisão. Impacto ambiental.

## ABSTRACT

Tailings dams are structures designed to retain solid wastes and water generated in the processing of metal ore. The overall planning of these dams starts with site selection, step in which all directly or indirectly influential variables should be considered: geological, hydrological, topographic, geotechnical, environmental and social characteristics, risk evaluation etc. This work presents a study of the utilization of the hierarchy analysis process (AHP) as a tool for decision-making in the selection of sites for tailings dams. The bibliographic review of relevant factors resulted in the proposal of a list of indicators, which was very useful as an orientation for data collection in the study case, and is considered as an important contribution from this research. The study case consisted in the location of the new copper tailings dam of MINER Inc. in Carmen de Atrato, Colombia. Initially, a geochemical software was applied to the region to discard unsuitable areas. For the selection of a site among three resulting alternatives, two aspects were taken into account: total initial cost and environmental impact. In the application of AHP, the main objective of the proposed hierarchy was the lowest environmental impact. Three possible causes were considered as the most important concerning environmental impact: dam and reservoir occupancy, dam collapse and transportation of wastes from the plant to the disposal site. Potential impacts on water, soil, fauna, flora and human occupation were analyzed. Costs were treated separately. Finally, a joint analysis of total initial costs and results from the AHP application was carried out in order to convey a support for the decision maker. A sensibility analysis was also performed to show the influence of one of the subcriteria on the final alternatives weights.

Key-words: Tailing dams. Decision. Environmental impact.

## SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	6
3	DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	7
3.1	Método de montante.....	8
3.2	Método de Jusante.....	11
3.3	Método da Linha de Centro.....	13
3.4	Deposição subterrânea (disposição em cavas de mineração).....	16
3.5	Deposição em “pit” (Processos de extração de minério a céu aberto).....	18
3.6	Deposição em pilhas controladas.....	19
4	FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS.....	21
4.1	Brawner e Campbell (1973).....	21
4.2	Vick (1981-1983).....	23
4.3	Ritcey (1989).....	27
4.4	Robertson et al (1980–81–82–83–99 e 2004).....	28
4.5	Zuquette e Gandolfi (2004), Liporaci e Zuquette (1995).....	37
4.6	Tabela Resumo.....	40
5	MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA.....	44
5.1	Métodos multicriteriais de auxílio à tomada de decisões.....	44
5.2	Conceituação do Método de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process – AHP).....	47
5.3	Estruturação da hierarquia.....	48
5.4	Julgamentos paritários.....	50
5.5	Prioridades relativas.....	51
5.6	Cálculo dos pesos finais.....	56
5.7	Variante multiplicativa do método de análise hierárquica.....	57
5.8	Por que o método de análise hierárquica?.....	58
6	METODOLOGIA.....	59
6.1	Definição de atributos relevantes.....	60
6.2	Estudo de caso.....	60

6.3	Avaliador geológico de prospecção.....	60
6.4	Definição de indicadores.....	61
7	ESTUDO DE CASO.....	65
7.1	Localização e estradas de acesso.....	65
7.2	Caracterização do meio físico – biótico.....	65
7.2.1	Mina.....	65
7.2.1.1	Usina de beneficiamento e barragens de rejeitos.....	68
7.2.1.2	Produção de resíduos e contaminantes.....	69
7.2.2	Geologia local.....	70
7.2.3	Geomorfologia.....	70
7.2.4	Hidrografia e dinâmica fluvial.....	73
7.2.5	Hidrologia.....	73
7.2.6	Clima.....	74
7.2.7	Flora.....	74
7.2.8	Fauna.....	75
7.2.9	Usos do solo.....	75
7.2.10	Caracterização do substrato rochoso.....	75
7.2.10.1	Rochas vulcânicas cretáceas (kv).....	75
7.2.10.2	Rochas sedimentares químicas cretáceas (kbc – wc).....	76
7.2.10.3	Rochas sedimentares clásticas cretáceas (kss).....	76
7.2.10.4	Depósitos quaternários (coluvião (qc) – aluvião (qal)).....	76
7.3	Avaliador geológico de prospecção.....	79
7.4	ALTERNATIVAS DE LOCAL.....	81
7.4.1	Local 1.....	81
7.4.2	Local 2.....	84
7.4.3	Local 3.....	86
8	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA NO ESTUDO DE CASO .....	89
8.1	Definição de critérios e sub critérios.....	89
8.2	Hierarquização do problema.....	92
8.3	Julgamentos paritários, prioridades relativas e consistência.....	92
8.4	Agregação de prioridades às alternativas.....	94
8.5	Aplicação da variante multiplicativa do método de análise hierárquica.....	96
8.6	Análise de sensibilidade.....	97

8.7	Considerações de custos dos locais .....	98
8.7.1	Custos dos terrenos.....	100
8.7.1.1	Custos das unidades habitacionais.....	101
8.7.1.2	Custo de unidades produtivas.....	101
8.7.2	Custos das escavações.....	102
8.7.3	Custos do aterro.....	103
8.7.4	Custos totais.....	104
8.8	Análise conjunta de custos totais e pesos resultantes da análise hierárquica.....	104
9	CONCLUSÕES.....	107
	REFERENCIAS.....	109
	ANEXOS .....	116

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeitos (La Asociación Minera de Canadá 1998). .....	3
Figura 2. Custos para minimizar o risco de acidentes vs custos de acidentes (Mello 1981).....	4
Figura 3. Método de montante (Vick 1981, modificado).....	9
Figura 4. Desvantagens do método de montante: (a) linha freática elevada; (b) superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos; (c) risco de ruptura por “piping” (Silveira e Reades 1973). .....	10
Figura 5. Método de jusante (Vick 1981, modificado).....	11
Figura 6. Método de jusante com enrocamento (Nieble 1976, modificado). .....	12
Figura 7. Método da linha de centro (Nieble 1976, modificado). .....	13
Figura 8. Comparação de volumes para vários tipos de barragem: (a) Método de montante. (b) Método de jusante. (c) Método da linha do centro (Vick 1983, modificado). .....	16
Figura 9. Deposição em “pit”: (a) Extração do minério total. (b) Deposição feita ao mesmo tempo do que a extração do mineiro ( Ritcey 1989, modificado). .....	18
Figura 10. Deposição em “pit”. .....	19
Figura 11. Programa de planejamento e projeto de uma barragem de rejeitos (Brawner e Campbell, 1973). .....	22
Figura 12. Represamento em anel: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983). .....	24
Figura 13. Represamento em anel: vista aérea (ICME-UNEP 1998).....	24
Figura 14. Represamento em bacia: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983).....	25
Figura 15. Represamento em bacia: mineração de ouro, Rio Paracatu Mineração, Minas Gerais (ICME-UNEP 1998). .....	25
Figura 16. Represamento a meia encosta: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983). .....	26
Figura 17. Represamento em vale: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983). .....	27
Figura 18. Represamento em vale: mineração de cobre, MINER S.A., Colômbia. ....	27
Figura 19. Aspectos técnicos que relacionam a barragem de rejeito e o meio ambiente. (Fonte:Zuquette–Gandolfi 2004, Modificado). .....	38
Figura 20. Modelo de hierarquização para avaliação de alternativas (Morita 1998). .....	49
Figura 21. Localização geográfica do Município de Carmen de Atrato. ....	66
Figura 22. Localização da área de estudo.....	67

Figura 23. Seção típica do depósito de minério. ....	68
Figura 24. Mosaico das fotografias aéreas. ....	71
Figura 25. Geologia Local. ....	72
Figura 26. Maciço rochoso com escarpa de falha, que situa o contato de rocha sedimentar clástica (Kss) com chert negro (Kbc). No declive há acumulação de coluvião (Qc) de grandes blocos. ....	77
Figura 27. “Chert” preto. ....	77
Figura 28. Vista panorâmica do lado norte da área de estudo, apresentando as estruturas rochosas. ....	78
Figura 29. Vista panorâmica do lado sul da área de estudo. ....	78
Figura 30. Geoquímica da zona de estudo: (a) Ouro, (b) Prata, (c) Chumbo, (d) Zinco. ....	80
Figura 31. Local No 1. ....	82
Figura 32. Perfil local No 1. ....	83
Figura 33. Local No 2. ....	85
Figura 34. Perfil local No 2. ....	86
Figura 35. Local No 3. ....	88
Figura 36. Perfil local No 3. ....	88
Figura 37. Hierarquia de ajuda na decisão de seleção de locais no estudo de caso. ....	92
Figura 38. Alteracion Julgamento Água – Ocupação Humana. ....	98
Figura 39. Representação das variáveis coeficiente de aspecto econômico e peso do local (Soares 2002, modificado).....	105
Figura 40. Análise conjunta de custos totais e pesos resultantes.....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais impactos ambientais da mineração no Brasil (Gomes Faria, 2002). .....	2
Tabela 2. Comparação entre as características das barragens de rejeitos (Vick 1983, modificado).....	15
Tabela 3. Vantagens e desvantagens dos três tipos de barragens de rejeitos (Soares 2004, modificado).....	15
Tabela 4. Seções transversais típicas de aterros hidráulicos (Espósito 2000, modificado).....	17
Tabela 5. Fatores que influenciam a escolha do local para barragem de rejeitos (Vick 1981-1983, modificado).....	23
Tabela 6. Critérios para a escolha do local para implantação de uma barragem de rejeitos (Ritcey 1989).....	29
Tabela 7. Critérios para excluir áreas na investigação regional. ....	31
Tabela 8. Critérios de investigação para identificar características desfavoráveis do local.....	32
Tabela 9. Avaliação qualitativa e classificação. ....	34
Tabela 10. Mecanismos de poluição.....	35
Tabela 11. Estrutura de avaliação MAA. ....	37
Tabela 12. Atributos para definição e delimitação de unidades do meio físico visando à seleção de áreas para disposição de resíduos. ....	39
Tabela 13. Tabela Resumo por autor.....	41
Tabela 14. Escala de julgamento paritário (Saaty 1999).....	50
Tabela 15. Índice randômico em função da ordem da matriz de comparações paritárias (Saaty 1980).....	55
Tabela 16 Indicadores sugeridos. ....	62
Tabela 17 Indicadores depois das reuniões “Brainstormig”.....	64
Tabela 18. Características das drenagens da mina e dos efluentes das barragens de rejeitos. .	69
Tabela 19. Comportamento da vazão do Rio Atrato no ponto “Puente Sanchez”. ....	74
Tabela 20. Volumes de materiais na construção da barragem no local 1.....	83
Tabela 21. Volumes de materiais na construção da barragem no local 2.....	86
Tabela 22. Volumes de materiais na construção da barragem no local 3.....	88
Tabela 23. Relação de critérios e sub-critérios com indicadores propostos. ....	90
Tabela 24 Critérios e sub-critérios que vão ser avaliados para o estudo de caso. ....	91

Tabela 25. Matriz pareada do nível 2. ....	93
Tabela 26. Matrizes pareadas do nível 3. ....	93
Tabela 27. Matrizes pareadas do nível 4. ....	94
Tabela 28. Autovetor da matriz do nível 2. ....	94
Tabela 29. Autovetores da matriz do nível 3. ....	95
Tabela 30. Autovetores da matriz do nível 4. ....	95
Tabela 31. Vetor final de menor impacto ambiental. ....	95
Tabela 32. Critérios e alternativas na variante multiplicativa do método AHP. ....	96
Tabela 33. Áreas, volumes, movimentos de terra e escavações nos diferentes locais. ....	100
Tabela 34. Características médias das propriedades rurais com igual valor potencial do solo (Quintero 2006, modificada para reais (R\$)). ....	100
Tabela 35. Inversão de capital em terras, infraestrutura e equipamentos. (Holmann 2003 – modificados os valores para reais (R\$)). ....	102
Tabela 36. Custo total dos terrenos (valores em reais (R\$), 2006). ....	102
Tabela 37. Custos de escavação (convertidos em reais (R\$)). ....	103
Tabela 38. Custos de terraplenagem (valores em reais (R\$)). ....	104
Tabela 39. Custos totais. ....	104
Tabela 40. Coeficientes de aspecto econômico. ....	105

## **1 INTRODUÇÃO.**

Um dos atores que potencialmente geram maior impacto no meio ambiente são as atividades de mineração. Nos países onde há falta de controle ambiental, a mineração gera conflitos sócio-ambientais, devido à sua interferência nos ecossistemas e nas comunidades. É imprescindível desenvolver novas tecnologias e/ou aplicar metodologias já disponíveis que minimizem esses impactos. Empresas de mineração atualmente têm consciência da necessidade de investimentos adicionais relacionados ao controle ambiental desde o início do projeto até a mitigação ambiental.

Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. Seu tratamento e armazenamento visando minimizar os custos e maximizar a segurança são um dos principais objetivos das mineradoras para cumprir as exigências ambientais, já que a disposição dos resíduos é catalogada como um custo adicional sem retorno dentro do projeto.

Existem dois tipos de resíduos produzidos pelas atividades mineradoras, os estéreis e os rejeitos. No decapeamento da jazida são produzidos materiais sem nenhum valor econômico, denominados estéreis; estes são dispostos, geralmente, em pilhas e utilizados algumas vezes no próprio sistema de extração do minério. Os rejeitos são resultantes do processo de beneficiamento do minério; contêm elevado grau de toxicidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes.

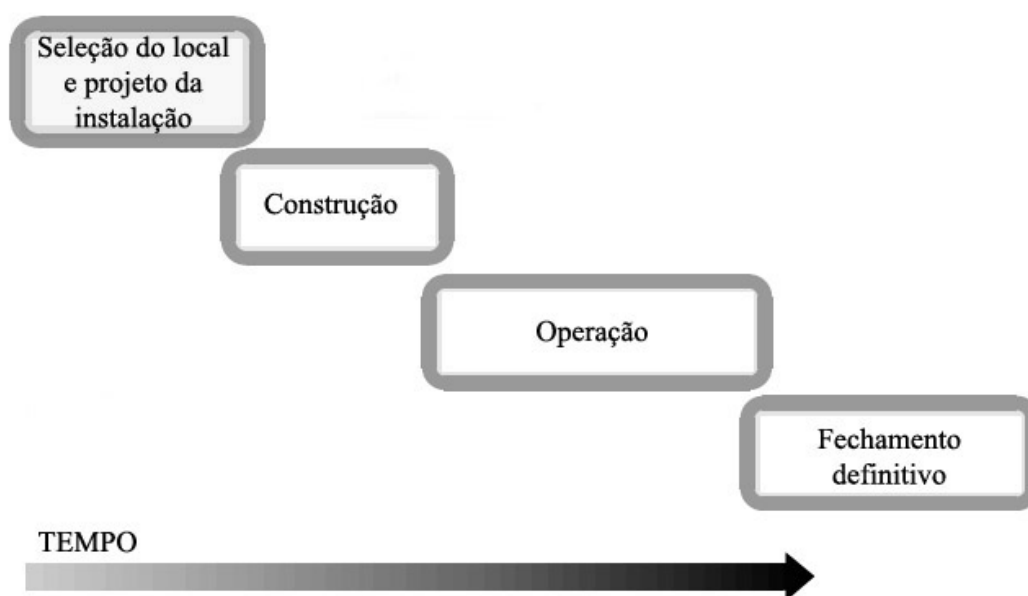
Nos processos de beneficiamento, a quantidade gerada de rejeitos é muito alta, e a disposição é feita, dependendo dos objetivos econômicos da mineradora, em superfície, ou vinculada no processo de extração do minério de forma subterrânea ou a céu aberto. Gomes Faria (2002) resume na Tabela 1 alguns dos impactos que geram as atividades mineradoras no Brasil.

Observa-se que as barragens de rejeitos, que são estruturas construídas com a finalidade de reter os rejeitos produzidos pelo processo de beneficiamento, representam uma fonte de poluição importante, portanto sua construção, desde a escolha da localização até o fechamento, deve seguir as normas ambientais e os critérios econômicos, geotécnicos, estruturais, sociais e de segurança e risco.

**Tabela 1. Principais impactos ambientais da mineração no Brasil (Gomes Faria, 2002).**

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e/ou Corretivas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais.	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; caracterização das barragens quanto à estabilidade; preparação de estudos para estabilização.
Ouro	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós.	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio.
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
	MT	Emissão de mercúrio na queima de amálgama.	Divulgação de técnicas menos impactantes.
Chumbo, Zinco e Prata.	SP	Rejeitos ricos em arsênio.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênio.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeitos de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação.	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro.
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida proveniente de antigos depósitos de rejeitos.	Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense.
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à criação desordenada de áreas alagadas.	Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento.
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias causados pelo transporte.	Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento e de transporte.
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do solo.	Aplicação de técnicas menos impactantes; estudos de alternativas de abastecimento.
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico.	Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Conama nº 5 de 06/08/1987 (proteção patrimônio espeleológico).
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido à utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita.	Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas
Cassiterita	RO e AM	Destruição de florestas e leitos de rios.	Racionalização da atividade para minimizar os impactos.

As etapas da vida útil de uma barragem de rejeitos compreendem a procura do local, o projeto da instalação, a construção, a operação e o fechamento definitivo (Figura 1). O processo de seleção de locais aptos divide-se em duas fases claramente diferenciadas. Na primeira fase realiza-se uma avaliação em grande escala, que tem como objetivo descartar áreas impróprias e obter uma classificação preliminar das zonas aceitáveis, baseada em fatores gerais. Podem-se utilizar avaliadores geológicos de prospecção como a geoquímica ou a geofísica, para identificar áreas potencialmente exploráveis para extração de minério. Áreas com aspectos legais impeditivos também são eliminadas nesta fase, como por exemplo, áreas de proteção ambiental e de patrimônio histórico. Na segunda fase, uma vez delimitadas regiões alternativas menores, utilizam-se fatores mais específicos de escolha.

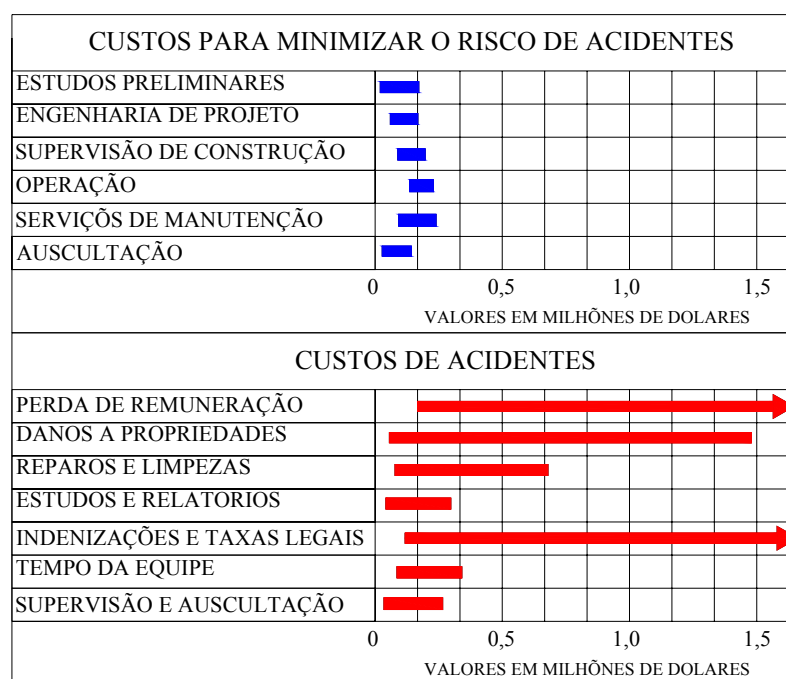


**Figura 1. Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeitos (La Asociación Minera de Canadá 1998).**

Para as empresas mineradoras as variáveis consideradas para determinar a melhor opção de local se limitam às econômicas, já que a disposição dos rejeitos é um investimento sem retorno a curto ou médio prazo. As novas legislações ambientais, porém, obrigam os mineradores a considerar também as variáveis ambientais, as estruturais, as geológicas e até os impactos que os rejeitos gerarão nas comunidades circunvizinhas.

É necessário na seleção de local vincular todo tipo de variáveis que direta ou indiretamente influenciam a obra: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos, entre outras. Segundo De Mello (1987), não se deve

subestimar o que pode suceder na construção, operação ou fechamento de uma barragem de rejeitos, a lista de checagem deve ser ampla, considerando tudo ou tanto quanto se possa imaginar como admissível: “O importante é não começar os raciocínios às avessas, admitindo que quase nada possa ocorrer, até ser surpreendido com a ocorrência”. No estudo apresentado por Mello (1981) sobre segurança das barragens de rejeitos nos Estados Unidos (Figura 2), observa-se que os custos nos estudos preliminares são muito menores do que os custos de um eventual acidente, isto é, o investimento nas etapas iniciais do planejamento garante a segurança das estruturas e representa uma economia em longo prazo.



**Figura 2. Custos para minimizar o risco de acidentes vs custos de acidentes (Mello 1981).**

Contudo, a tomada de decisões na localização da barragem de rejeitos geralmente não utiliza métodos apropriados, que estabeleçam claramente as variáveis envolvidas e que associem um peso ou um valor obtido com consistência matemática a cada alternativa.

Segundo Galves (1995), a partir do início dos anos 60 houve uma crescente conscientização quanto à necessidade de se considerarem vários objetivos na análise e solução dos problemas relacionados a obras de grande porte. O enfoque tradicional, baseado na estimativa de benefícios e custos, deu lugar a uma abordagem mais realista, que inclui objetivos ambientais e sociais, com o subsequente desenvolvimento de diversos métodos de auxílio à decisão, capazes de tratar problemas com objetivos múltiplos de uma maneira formal.

A aplicação de um método de análise formal e rigoroso matematicamente pode contribuir para a definição objetiva do problema, a possibilidade de comunicação do problema em uma linguagem universal, a contribuição na tomada de decisões coletivas e a possibilidade de realizar análises de sensibilidade, além de indicar os aspectos a serem aperfeiçoados na continuidade do processo de planejamento.

Um dos métodos que tem aceitação nos processos de análise multicriterial é o método de análise hierárquica ou AHP (Analytic Hierarchy Process), que tem sido utilizado desde sua criação por Thomas Saaty em 1977 em múltiplos problemas de natureza quantitativa e qualitativa. Em nível mundial tem-se conhecimento da aplicação deste método em problemas econômicos/gerenciais (finanças, previsão macroeconômica, estratégia, planejamento, alocação de recursos, transporte, recursos hídricos), políticos (controle de armas nucleares, conflitos e negociação, influência mundial), sociais (educação, meio ambiente, saúde, jurídico, medicamentos) e tecnológicos (seleção de mercados, transferência tecnológica).

Este método também tem sido utilizado em pesquisas de mestrado e doutorado da Universidade de São Paulo, nas áreas da engenharia de produção (Carvalho 1997, Morita 1998, Moares 2003, Enoki 2006), transportes (Figueredo 1999, Iañez 2002, Lisboa 2002, Gimenes 2002, Gonçalves 2005), naval e oceânica (Garber 2002), civil (Silva 2003), recursos hídricos (Zuffo 1998), geociências (Nunes 2002) e mapeamento geotécnico (Marques 2002).

O método de análise hierárquica é de fácil aplicação do ponto de vista matemático; por outro lado, a utilização adequada requer um conhecimento profundo do problema e do próprio método, o que justifica o número de pesquisas citadas em diferentes áreas do conhecimento. Neste trabalho é desenvolvida a aplicação do método de análise hierárquica na seleção de locais para barragens de rejeitos. Procura-se assim incentivar a tomada de decisões para este tipo de obra com base em métodos de análise multicriterial, incorporando os aspectos social e ambiental, e ao mesmo tempo se realiza uma aplicação inédita para o método de análise hierárquica.

## **2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.**

O objetivo desta dissertação é a aplicação do método de análise hierárquica como apoio à tomada de decisões para a localização de barragens de contenção de rejeitos de mineração, levando em conta o maior número possível de variáveis relevantes.

O desenvolvimento do trabalho compreendeu os seguintes objetivos específicos:

- Levantar, por meio de revisão bibliográfica e entrevistas com profissionais, os dados, métodos e indicadores comumente utilizados na etapa de planejamento de procura de locais para barragens de rejeitos, bem como os critérios empregados para sua seleção.
- Familiarização com o método de análise hierárquica, sua fundamentação teórica e exemplos de aplicação.
- Apresentação de um estudo de caso.
- Aplicação do método de análise hierárquica ao estudo de caso.
- Realização de análises de sensibilidade.
- Análise crítica dos resultados.

### **3 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.**

As atividades mineradoras geram uma grande quantidade de resíduos sólidos, dos quais os mais importantes em termos de volume são os gerados pelas atividades de extração de minério (estéreis) e pelas usinas de beneficiamento (rejeitos). Nesta pesquisa trataremos apenas da disposição dos rejeitos.

Os rejeitos são partículas sólidas resultantes da britagem, da moagem e, eventualmente, do tratamento químico do minério, sem nenhum valor econômico. A granulometria dos rejeitos varia em função do tipo de minério. Os rejeitos são transportados para os locais de disposição em tubulações, por gravidade ou por bombeamento, com grande quantidade de água. Chama-se polpa a suspensão de rejeitos e água, sendo que a porcentagem de água é de aproximadamente 70%.

A disposição dos rejeitos pode ser feita a céu aberto, de forma subterrânea, ou subaquática. A disposição subaquática não é muito utilizada pelos problemas ambientais que gera; os impactos aos ecossistemas aquáticos são negativos e algumas vezes irreversíveis. A disposição subterrânea é feita em câmaras que restam depois da extração do minério; os rejeitos são bombeados na maioria dos casos e depositados preenchendo essas câmaras. A disposição mais comum é a céu aberto, e pode ser feita em pilhas controladas ou em estruturas de contenção localizadas em bacias ou vales. Também existem disposições dos rejeitos vinculadas com os sistemas de extração do minério, por deposição subterrânea e a céu aberto; nesse caso, os rejeitos formam camadas de fundação para os equipamentos de extração.

Segundo Vick (1983), a estrutura de contenção é construída levantando-se inicialmente um dique de partida com solo de empréstimo, o qual deve ter uma capacidade de retenção de rejeitos para dois ou três anos de operações da lavra. Os estágios posteriores (alteamentos) podem ser construídos também com material de empréstimo, com estéreis, por deposição hidráulica de rejeitos ou por ciclonagem dos mesmos rejeitos. A ciclonagem é feita com um equipamento chamado ciclone, que separa granulometricamente, por efeitos da pressão, partículas menos densas e finas de partículas mais densas e grossas. A polpa de rejeitos entra no ciclone e é separada em dois fluxos: “overflow”, composto de partículas mais finas e

menos densas que saem pela parte superior do ciclone e “underflow”, de partículas mais grossas e mais densas que saem pela parte inferior do ciclone.

Os alteamentos podem assumir diferentes configurações, cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens. Os métodos de alteamento são geralmente classificados em três classes: método de montante, método da jusante e método da linha de centro. Os nomes referem-se à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique inicial.

### **3.1 Método de montante.**

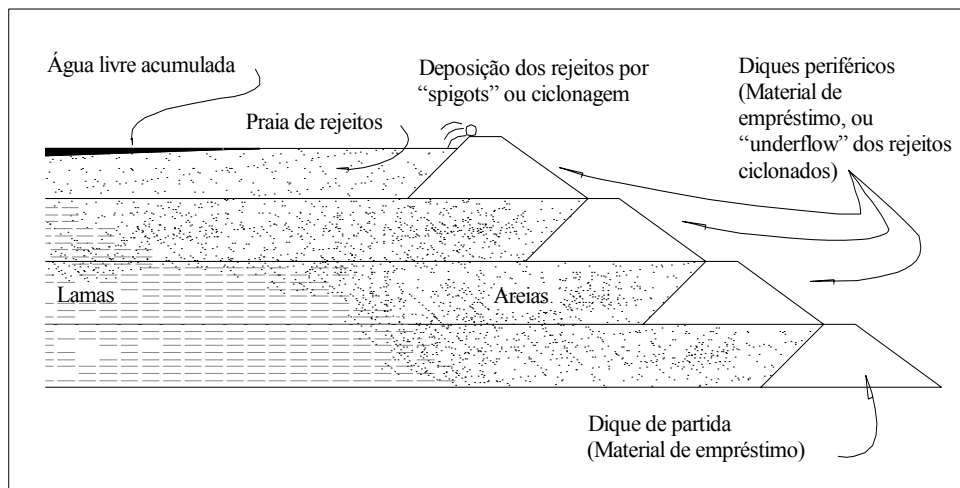
Na Figura 3 é apresentado o método de montante. Inicialmente é construído o dique de partida e nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para montante.

A polpa é descarregada ao longo do perímetro da crista do dique, formando uma praia. A descarga pode ser feita com ciclones, ou com uma seqüência de tubulações menores perpendiculares à tubulação principal, chamados “spigots”, que permitem uma melhor uniformidade na formação da praia. Como os rejeitos têm uma distribuição granulométrica ampla, as partículas mais grossas e mais pesadas sedimentam mais rapidamente, ficando nas zonas perto do dique, e as partículas menores e menos densas ficam em suspensão e são transportadas para as zonas internas da bacia de sedimentação.

Nas etapas posteriores, são construídos diques em todo o perímetro da bacia. O tamanho dos diques nos alteamentos é uma variável que depende das necessidades operacionais da mina. O dique inicial geralmente é sempre maior que os diques das etapas seguintes.

Se os alteamentos forem construídos com rejeitos, é necessário que esses contenham de 40 a 50% de areia e que na descarga a polpa seja de alta porcentagem de sólidos por peso para que ocorra a segregação granulométrica; essa alta porcentagem de sólidos pode ser obtida pela ciclonagem da polpa (Vick, 1983).

Como todo método de construção, apresenta vantagens e desvantagens (Nieble 1976, Burke 1973, Vick 1981-1983, Assis e Espósito 1995, Sanchez 2000).



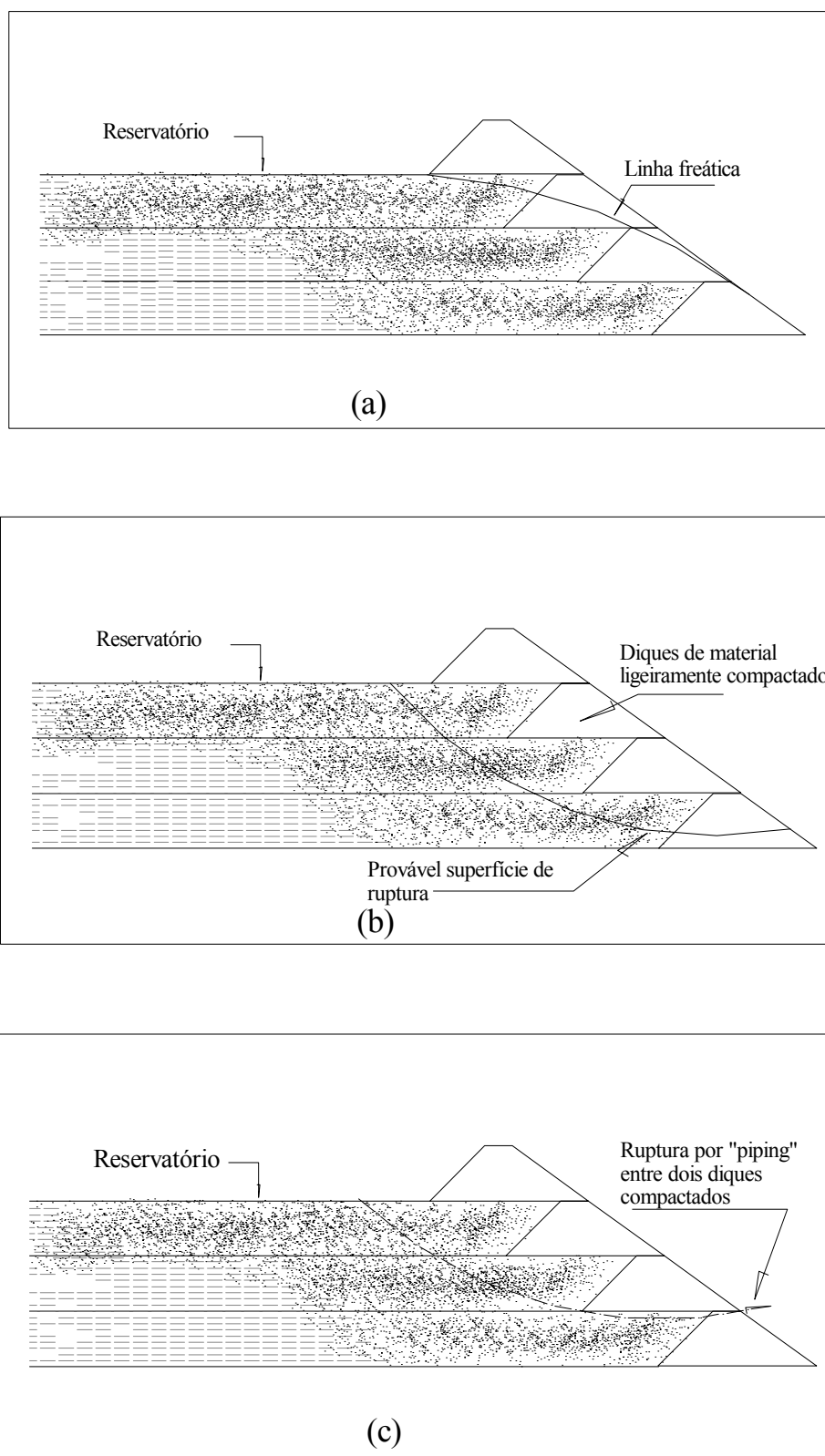
**Figura 3. Método de montante (Vick 1981, modificado).**

Vantagens:

- O volume de material (de rejeitos ou de empréstimo) dos alteamentos é menor.
- Menor custo de construção.
- Maior velocidade de alteamento.
- Facilidade de operação.
- Pode ser construída em topografias muito íngremes, onde o limitante principal é a área de deposição.

Desvantagens: (ver Figura 4)

- Baixa segurança (a linha freática muito próxima ao talude da jusante).
- Susceptibilidade à liquefação por sismos naturais ou por vibrações decorrentes do movimento de equipamentos, quando os alteamentos são realizados com os rejeitos, isto devido à fundação dos alteamentos ser constituída de areias saturadas fofas não compactadas e/ou não classificadas (rejeitos descarregados por "spigots").
- Quando os rejeitos não são compactados ou ligeiramente compactados, a superfície crítica de deslizamento passa pelos rejeitos sedimentados.
- Existe a possibilidade de ocorrência de "piping" devido à linha freática estar muito próxima do talude da jusante e à não compactação dos rejeitos, ou quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados.

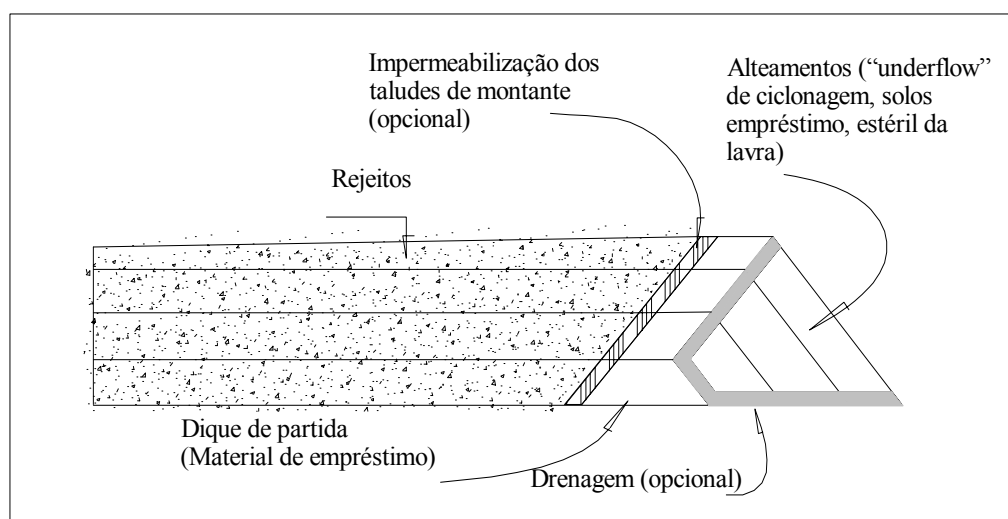


**Figura 4. Desvantagens do método de montante: (a) linha freática elevada; (b) superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos; (c) risco de ruptura por “piping” (Silveira e Reades 1973).**

### 3.2 Método de Jusante.

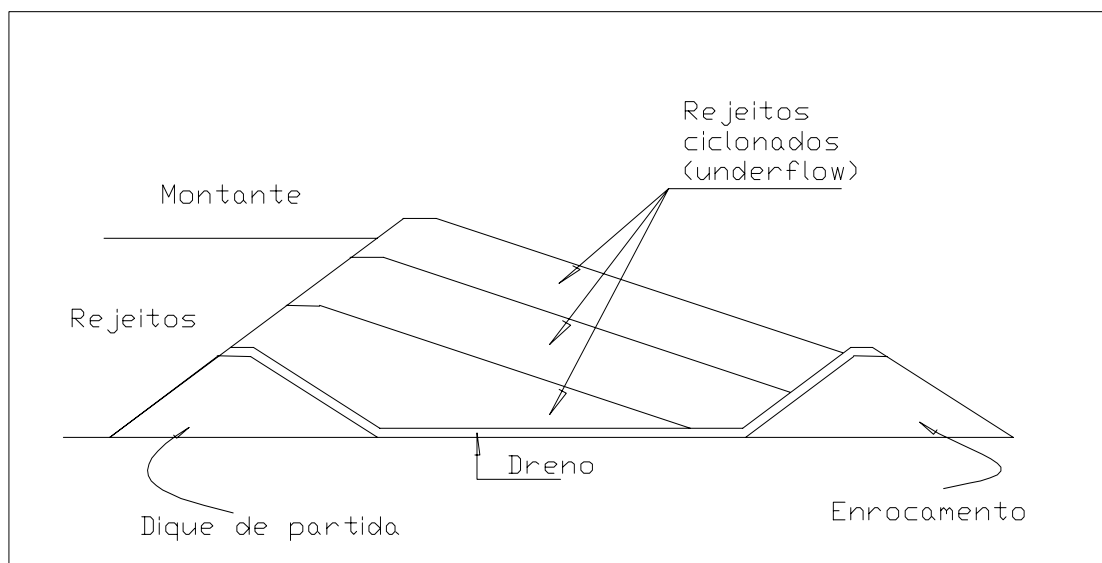
Na Figura 5 é apresentado o método da jusante; é chamado assim por que nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para jusante. É construído um dique inicial impermeável, o qual deve ter uma drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante. O talude interno da barragem ou talude de montante, nos alteamentos, é impermeabilizado. A drenagem interna e a impermeabilização do talude de montante não são obrigatórias se os rejeitos possuem características de alta permeabilidade e ângulo de atrito elevado.

Neste método os rejeitos são ciclizados e o “underflow” é lançado no talude da jusante. Somente são utilizados os rejeitos grossos no alteamento, os quais são compactados quando as características de umidade da zona o permitam; também se pode utilizar material de empréstimo, ou estéril proveniente da lavra.



**Figura 5. Método de jusante (Vick 1981, modificado).**

Existem variantes do método da jusante, como mostra a Figura 6, onde são construídos um dique inicial e um dique de enrocamento; os rejeitos ciclizados vão sendo depositados entre essas duas estruturas para formar os alteamentos. Observa-se que neste método a quantidade de rejeitos para realizar os alteamentos deve ser maior do que no método de jusante convencional. A camada impermeabilizante do talude da montante é substituída por um tapete drenante do dique inicial ao dique de enrocamento, para que a linha freática não fique próxima do talude da jusante.



**Figura 6. Método de jusante com enrocamento (Nieble 1976, modificado).**

As vantagens e desvantagens do método de jusante estão apresentadas a seguir (Nieble 1976, Burke 1973, Vick 1981-1983, Assis e Espósito 1995, Sanchez 2000).

#### Vantagens:

- O método é eficiente para o controle das superfícies freáticas, pela construção de sistemas contínuos de drenagem.
- Pode ser usado em lugares com vibrações e/ou alta sismicidade, já que, se compactados os rejeitos do “underflow”, a susceptibilidade de liquefação é muito menor.
- Operação bastante simples.
- Possibilita a compactação de todo o corpo da barragem.
- Maior segurança devido aos alteamentos controlados (disposição da fração grossa dos rejeitos a jusante, sistemas de drenagem e compactação): as probabilidades de “piping” e de rupturas horizontais são muito menores.
- O estéril proveniente da lavra pode ser utilizado, e/ou misturado nos alteamentos.

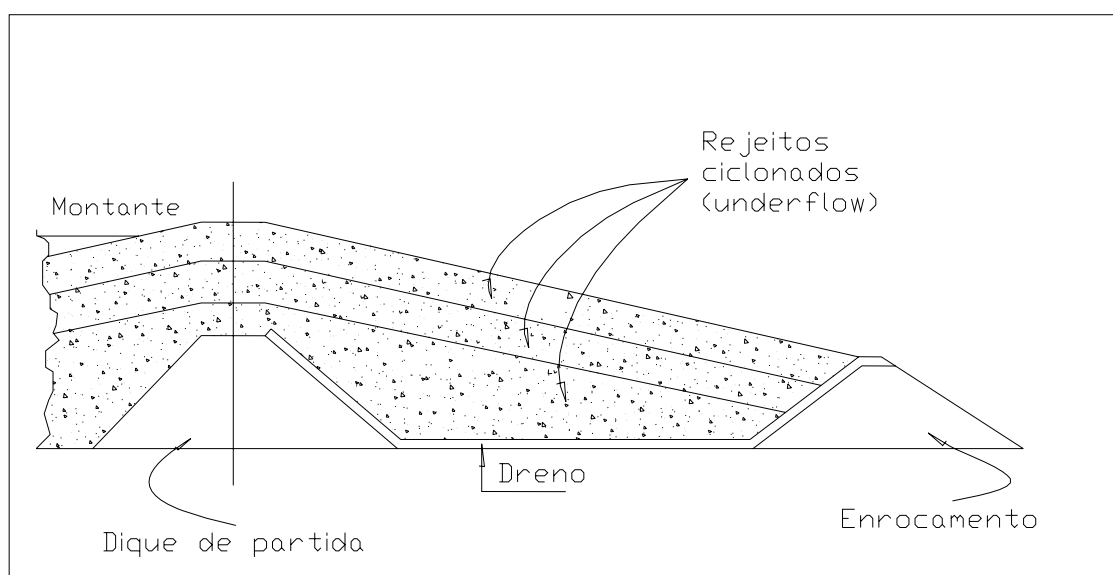
#### Desvantagens:

- Necessidade de grandes quantidades de rejeitos nas primeiras etapas da construção.
- Dependendo das características dos rejeitos, os problemas de área se incrementariam, devido aos taludes bastante abatidos.
- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes, havendo probabilidade de colmatação.

- Devido à complexidade dos diques de partida e de enrocamento e aos sistemas de drenagem, os investimentos iniciais são altos.
- Em zonas de alta pluviosidade é possível que os rejeitos a jusante não possam ser compactados adequadamente, devendo-se esperar épocas de estio para a operação de equipamentos em cima dos rejeitos.
- Não possibilita a proteção com cobertura vegetal no talude de jusante, e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos.
- É necessário o emprego de ciclones para garantir uma ótima separação dos rejeitos.

### 3.3 Método da Linha de Centro.

O método da linha de centro, chamado assim porque o eixo da barragem é mantido na mesma posição enquanto ela é elevada, é uma solução intermediária entre o método de montante e o de jusante (inclusive em termos de custo), embora seu comportamento estrutural se aproxime do método da jusante. Na Figura 7 se apresenta o método da linha do centro. Inicialmente é construído um dique de partida e o rejeito é lançado perifericamente da crista do dique até formar uma praia. O alteamento subsequente é formado lançando materiais de empréstimo, estéril da mina ou “underflow” de ciclones, sobre o limite da praia anterior e no talude de jusante do maciço de partida, mantendo o eixo coincidente com o eixo do dique de partida.



**Figura 7. Método da linha de centro (Nieble 1976, modificado).**

Por ser uma combinação dos dois métodos descritos anteriormente, as vantagens e desvantagens são similares às dos mesmos, tentando minimizar as desvantagens.

Vantagens:

- Facilidade na construção.
- Eixo dos alteamentos constante.
- Redução do volume de “underflow necessário” em relação ao método da jusante.

Desvantagens:

- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante (se o material de rejeito fica saturado a jusante, pode comprometer a estabilidade do maciço).
- Operação complexa; é necessário equipamento para deposição mecânica a jusante.
- Pela complexidade da operação, os investimentos globais podem ser altos.

Na Tabela 2 apresentam-se as características principais, aspectos de segurança, e os custos relativos em função ao volume da barragem alteada pelo método de montante; são feitas também comparações com as barragens de terra convencionais para armazenamento de água. Na Tabela 3 se sintetizam os métodos construtivos dos três tipos de barragens descritos, além de algumas das vantagens e desvantagens. Na Figura 8 são apresentadas comparações de área de seção transversal dos três tipos de barragens de rejeitos, com mesma altura e capacidade de deposição de rejeitos.

Como se viu anteriormente, o método de jusante tem as melhores características de estabilidade; porém, o volume necessário de “underflow”, material de empréstimo ou estéril da lavra, é três vezes o do método de montante, o que se relaciona, logicamente, com os custos do projeto total.

Deve-se observar que as características das barragens construídas com rejeitos são diferentes das construídas com materiais de comportamento geotécnico melhor, como solos de empréstimo ou estéril proveniente da lavra. Quando os alteamentos são feitos com os rejeitos, o corpo da barragem se comporta como um aterro hidráulico, onde o material é lançado de uma forma quase aleatória, sem controle das variáveis que influenciam o processo de deposição.

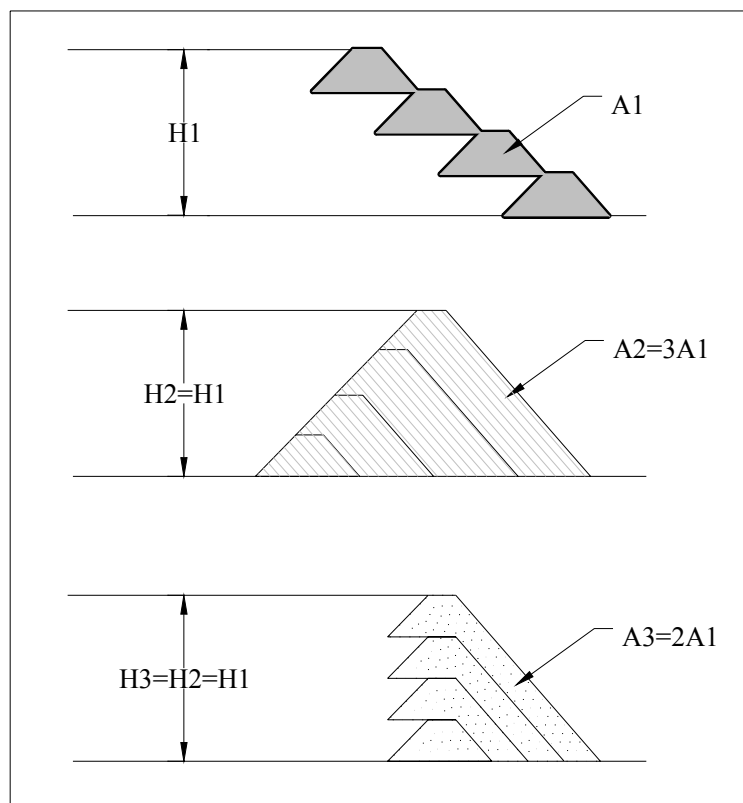
Tabela 2. Comparação entre as características das barragens de rejeitos (Vick 1983, modificado).

	Convencional	Montante	Jusante	Linha de centro
<b>Tipo de rejeito recomendado</b>	•Qualquer tipo	•Mais de 40% de areia •Baixa densidade de polpa para promover segregação	•Qualquer tipo	• Areias ou lamas de baixa plasticidade
<b>Requerimentos de descarga dos rejeitos</b>	•Qualquer procedimento de descarga	•Descarga periférica, e bom controle de água livre acumulada	•De acordo com o projeto	•Descarga periférica, conservando o eixo da barragem
<b>Armazenamento d'água</b>	•Boa	•Não recomendado para grandes volumes	•Boa	•Não recomendado para armazenamento permanente
<b>Resistência sísmica</b>	•Boa	•Fraca em áreas de alta sismicidade	•Boa	•Aceitável
<b>Restrições de alteamento</b>	•De uma só vez, ou em poucas etapas	•Recomendável menos de 5 a 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano	•Nenhuma	•Pouca
<b>Requisitos de alteamento</b>	•Materiais naturais e/ou estéril	•Solo natural •Rejeitos ou estéril	•Rejeitos ou estéril	•Rejeitos ou estéril
<b>Custo relativo do corpo do aterro</b>	•Alto (3 $V_m$ *)	•Baixo $V_m$	•Alto (3 $V_m$ )	•Moderado (2 $V_m$ )

\* $V_m$  = volume da barragem alteada pelo método de montante

Tabela 3. Vantagens e desvantagens dos três tipos de barragens de rejeitos (Soares 2004, modificado).

	Método de montante	Método de jusante	Método da linha de centro
<b>Método construtivo</b>	•Método mais antigo, e o mais empregado. •Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com “underflow” de cicloneagem. •Lançamento a partir da crista por cicloneagem ou “spigots”.	•Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. •Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. •Dreno interno e impermeabilização a montante.	•Variação do método de jusante.
<b>Vantagens</b>	•Menor custo. •Maior velocidade de alteamento. •Utilizado em lugares onde há limitante de área.	•Maior segurança. • Compactação de todo o corpo da barragem. •Pode-se misturar os estéreis da lavra.	•Variação do volume de “underflow” necessário com relação ao método da jusante.
<b>Desvantagens</b>	•Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de “piping”.	•Necessidade de grandes quantidades de “underflow” (problemas nas 1 <sup>as</sup> etapas). •Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).	• Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante



**Figura 8. Comparação de volumes para vários tipos de barragem: (a) Método de montante. (b) Método de jusante. (c) Método da linha do centro (Vick 1983, modificado).**

As propriedades do aterro hidráulico dependem do método de deposição e da composição da polpa (tipo de fluido de transporte, distribuição granulométrica, geometria dos grãos, textura e densidade, porcentagem de sólidos por peso da polpa), que definem o comportamento de segregação da polpa na deposição, influenciando a geometria da estrutura do corpo da barragem. Na Tabela 4 são apresentados alguns exemplos de seções transversais típicas onde a segregação dos materiais, pelas suas características, muda a geometria da deposição. Dois estudos detalhados aplicados a rejeitos de mineração como material da estrutura são apresentados por Espósito (2000) e Ribeiro (2000)

### **3.4 Deposição subterrânea (disposição em cavas de mineração).**

A deposição subterrânea pode ter certos méritos em casos especiais, nos quais os rejeitos podem ser considerados inertes e sem perigos potenciais. No entanto, muitos rejeitos com o tempo podem gerar poluentes (por exemplo, a percolação d'água através dos rejeitos pode dissolver vários poluentes metálicos, pode ocorrer oxidação de enxofre e produção de ácidos, por redução do pH), e, portanto, contaminar águas subterrâneas. Os rejeitos podem ser

bombeados diretamente na cava da mina, ou pode-se retirar água dos mesmos para melhorar suas características de deposição; isto depende dos métodos de extração do minério.

**Tabela 4. Seções transversais típicas de aterros hidráulicos (Espósito 2000, modificado).**

<b>Perfil Zonado ou Heterogêneo</b>	<b>Seção</b>
Os espaldares são formados pela segregação hidráulica, e o núcleo é constituído por material de empréstimo com coeficiente de não uniformidade menor do que 3, com espessura controlada pela distribuição granulométrica do material de empréstimo, especialmente pela porcentagem de finos, possuindo baixa permeabilidade	
<b>Perfil Homogêneo</b>	<b>Seção</b>
Apresenta taludes abatidos, sendo indicado para barragens com menos de 30 metros. Entretanto a prática brasileira apresenta barragens de 70 a 100 m de altura (Xingu, Monjolo). Barragens com esses perfis possuem distribuição granulométrica similar ao longo de toda a seção e material de empréstimo com CNU muitas vezes menor do que 2. Uma outra característica é a não formação de lago durante a construção desse perfil	
<b>Perfil Misto</b>	<b>Seção</b>
Composto por uma parte de material depositado mecanicamente (lançado ou compactado) e outra hidráulicamente. Sua construção começa com material lançado mecanicamente nos espaldares, sendo o espaço entre elas preenchido hidráulicamente. Limita a largura da barragem aumentando a resistência contra terremotos	

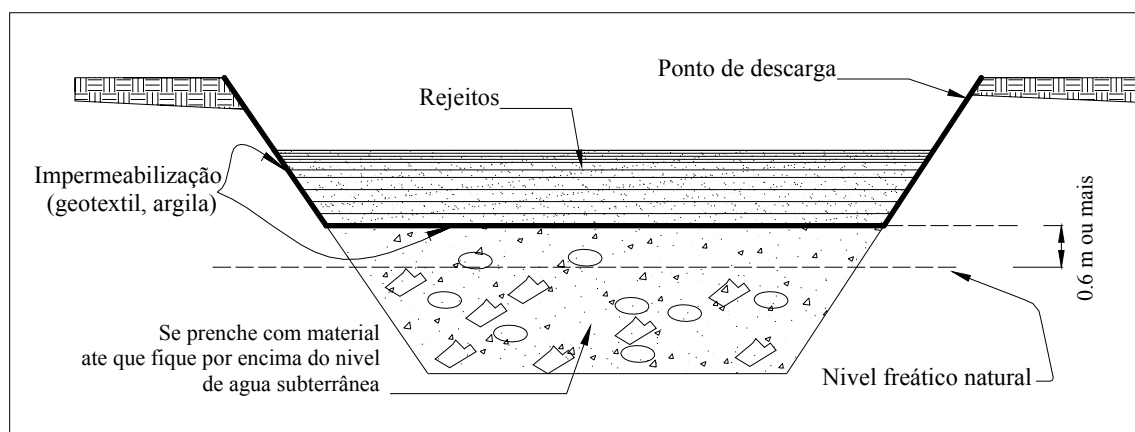
Segundo Vick (1983), o retorno dos rejeitos à mina é feito comumente por um ou mais dos seguintes três propósitos:

- Proporcionar um piso de trabalho para as atividades de extração de minério.
- Proporcionar suporte às paredes das escavações subterrâneas.
- Maximizar a recuperação do corpo do minério.

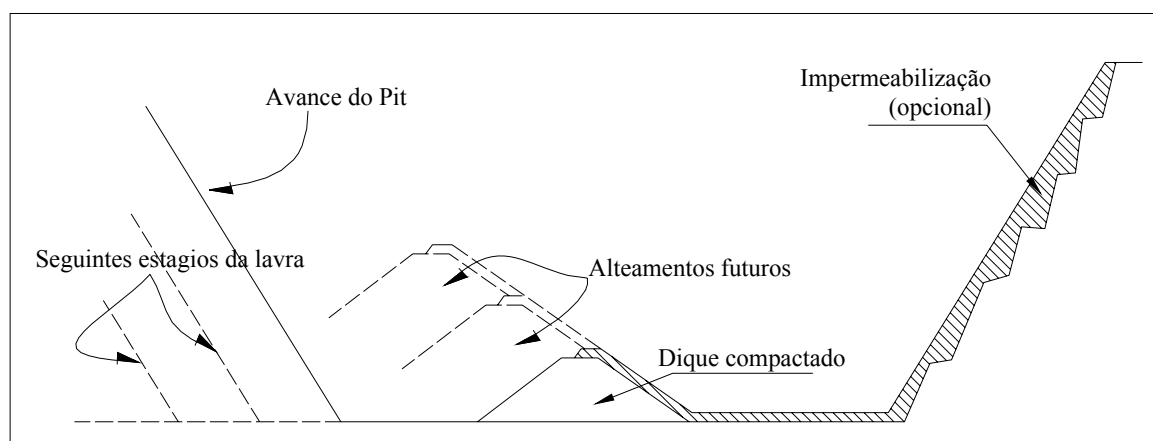
Além disso, os próprios rejeitos devem apresentar alta permeabilidade, baixa compressibilidade e alta rigidez. Pode-se conseguir baixa compressibilidade removendo os finos da polpa ou por compactação vibratória, que também aumenta a densidade do rejeito.

### 3.5 Deposição em “pit” (Processos de extração de minério a céu aberto).

Este tipo de deposição é feito tipicamente em minas a céu aberto onde não é necessária a construção de diques. Na Figura 9 são apresentados os dois tipos de deposições, quando a extração do minério foi completa (Figura 9a), e quando a deposição é feita ao mesmo tempo do que a extração de minério (Figura 9b). A Figura 10 ilustra um caso de aplicação numa mina nos Estados Unidos.



(a)



(b)

**Figura 9. Deposição em “pit”:** (a) Extração do minério total. (b) Deposição feita ao mesmo tempo do que a extração do mineiro ( Ritcey 1989, modificado).



**Figura 10. Deposição em “pit”.**

Ritcey (1989) descreve algumas características na deposição de rejeitos em “pit”:

- O projeto de cobertura final é fácil, se assegura mínima erosão e boa drenagem.
- Mínima poluição de ar.
- A extração pode ser feita por um tempo, e depois os rejeitos são depositados. É construído usualmente um pequeno “pit” que é usado nos primeiros estágios da deposição de rejeitos.
- Tem um mínimo de risco de falha, exceto pela estabilidade dos taludes internos do “pit”.

Os parâmetros hidrogeológicos, considerando migração de poluentes e percolação, não são conhecidos com exatidão, então se a rocha de encaixe do minério não for suficientemente impermeável, precisa-se de impermeabilização (geomembrana ou argilas) nos taludes do “pit”.

### **3.6 Deposição em pilhas controladas.**

Segundo Sanchez (2000), as pilhas são sistemas de deposição de rejeitos em que inicialmente extrai-se a água da polpa e a fração sólida é armazenada ou conformada em pilhas em locais adequados. Para garantir a estabilidade de longo prazo da pilha, os rejeitos têm que ser misturados com material de empréstimo para melhorar a resistência (dependendo dos rejeitos, pode ser necessário misturar finos ou materiais granulares), ou deve haver uma separação

prévia da fração argilosa. A extração de água e a separação da fração argilosa geralmente se fazem em barragens de rejeitos já construídas; é escavado o material já seco, que é então transportado em caminhões e deposto em pilhas controladas, enquanto a cavidade formada na barragem é novamente utilizada para deposição de rejeitos recentes.

Vick (1983) se refere a outro mecanismo para baixar a umidade dos rejeitos, que é feito em correias filtrantes e bombas de vácuo. A umidade se reduz de 50% a 20-30%, os rejeitos são transportados pelas mesmas correias e depostos nas pilhas controladas, mas os custos de operação e manutenção do equipamento são muito altos.

Os componentes de uma pilha controlada são: dique de partida (que neste caso é um dique de menores dimensões), drenos periféricos na pilha, drenos internos, e drenos superficiais se a pilha é construído num talude. As vantagens deste tipo de deposição são ambientais, pois as pilhas podem ser construídas sem interferir com a rede de drenagem, e econômicas, pois não há necessidade de sistemas extravasores (Sanchez, 2000).

## **4 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS.**

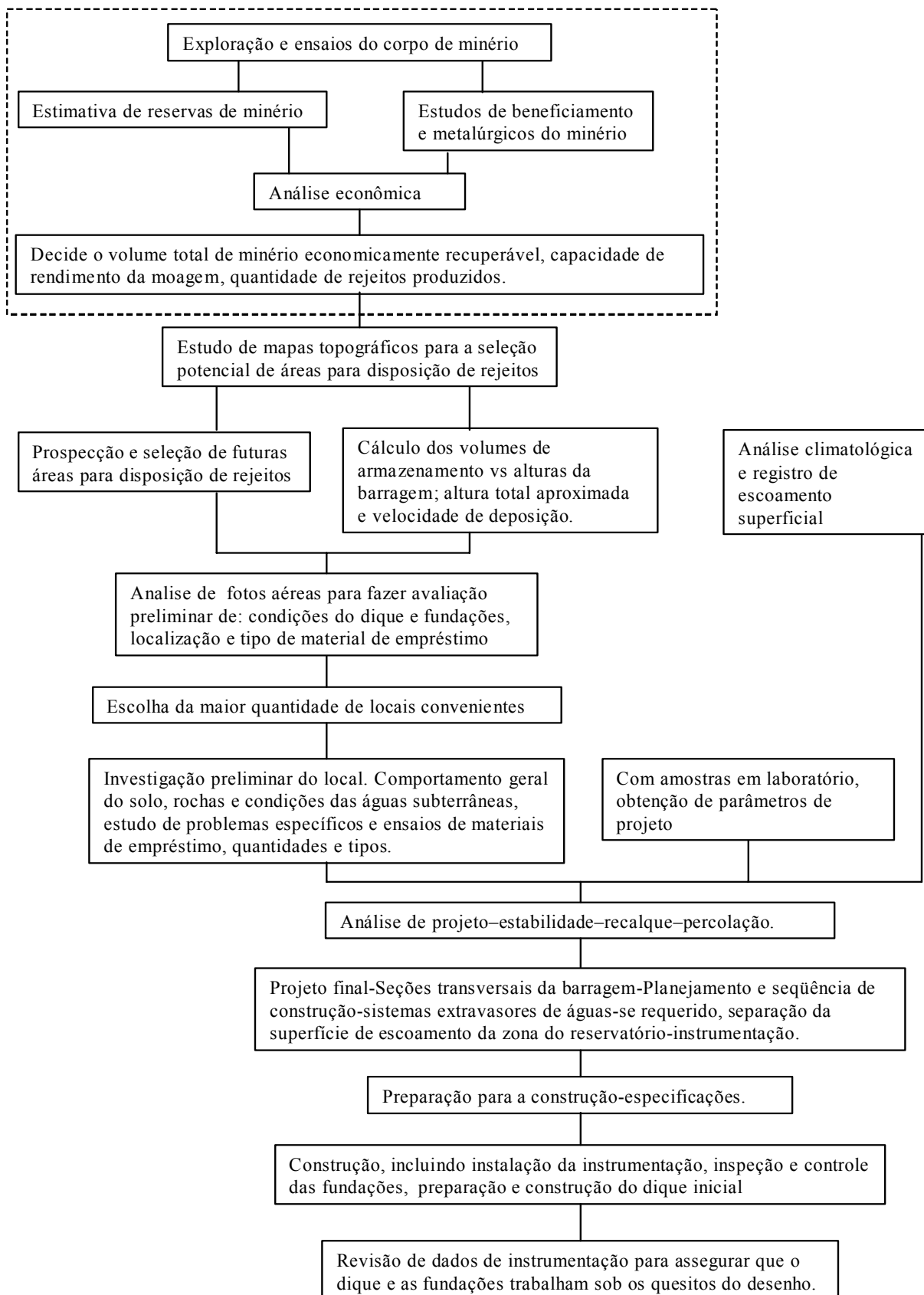
São muitas as variáveis que se consideram na escolha de locais para a implantação de barragens de rejeitos. A seguir, é apresentada uma revisão dos principais fatores a considerar neste tipo de tomada de decisões a partir da experiência de alguns autores reconhecidos, que servirá de base para a aplicação da metodologia de tomada de decisões por análise hierárquica na seleção de áreas para barragens de rejeitos.

### **4.1 Brawner e Campbell (1973).**

Brawner e Campbell enfatizam que cada mina e cada local tem características diferentes e únicas, e sugerem um guia que serve como base para o projeto e planejamento da construção da barragem de rejeitos, apresentado na Figura 11. É importante notar que cada projeto tem que minimizar as perdas e maximizar os benefícios dentro dos requerimentos de estabilidade, segurança e aspetos ambientais, e deve ser baseado nas condições do local, nos custos e tempo de construção, e na produção da mina.

Para empresas que ainda não têm um projeto definido, há na Figura 11 um retângulo de linhas tracejadas que corresponde à etapa inicial de prospecção, estimativa de reservas, análise econômica, quantidade de rejeitos que serão produzidos, isto é, todos os estudos prévios de viabilidade do projeto da jazida.

O planejamento e o projeto da barragem de rejeitos devem incluir programas de ensaios em campo e em laboratório das fundações, rochas e materiais de empréstimo, para avaliar suas propriedades físicas e mecânicas, além das características das águas subterrâneas, sua localização e composição. No planejamento de uma barragem de rejeitos, são fundamentais análises de estabilidade, previsão de recalques, estudo da percolação, controle de erosão, estudo de impactos ambientais e de recuperação ambiental. Na etapa de construção, a instrumentação de campo é importante para assegurar que a obra cumpra as especificações de projeto.



**Figura 11. Programa de planejamento e projeto de uma barragem de rejeitos (Brawner e Campbell, 1973).**

#### 4.2 Vick (1981-1983).

Os fatores que determinam o local da barragem não são fixos. A descoberta de aspectos geológicos e/ou condições das águas subterrâneas adversos, ou ainda a incapacidade de identificar locais em superfície viáveis econômica e tecnicamente, fazem necessário avaliar outras formas de disposição de rejeitos, como a disposição subterrânea, em “pit” ou em pilhas controladas. Na Tabela 5, são apresentados os fatores que, segundo Vick (1981-1983), influenciam a escolha do local para a construção da barragem de rejeitos.

**Tabela 5. Fatores que influenciam a escolha do local para barragem de rejeitos (Vick 1981-1983, modificado).**

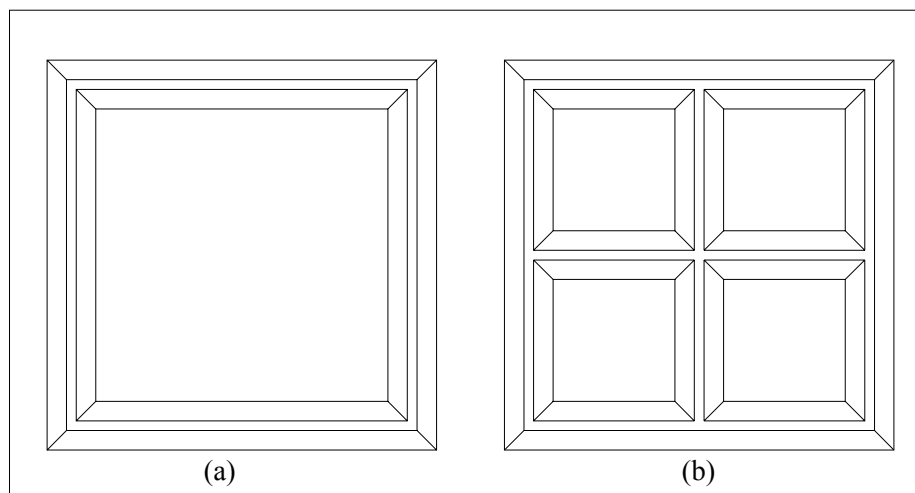
Parâmetro	Efeitos
Local e elevação relativa da usina de beneficiamento	-Comprimento da tubulação de condução dos rejeitos e retorno de água. -Custos de operação dos mecanismos de bombeamento.
Topografia	-Arranjo da barragem -Especificações de deposição e preenchimento da barragem. -Facilidade de mudança na disposição
Hidrologia e área de captação	-Tempo de acumulação de água suficiente para permitir a sedimentação. -Especificações de manejo de inundações
Geologia	-Viabilidade de materiais de empréstimo, tipos e quantidades. -Perdas por percolação, permeabilidades. -Estabilidade das fundações -Falhas, sismicidade, estruturas de contenção de taludes de corte
Águas subterrâneas	-Vazão e direção de percolação -Potencial de contaminação -Teor de umidade de materiais de empréstimo.
Clima	-Taxa anual de precipitação e evaporação.

A viabilidade de um local pode ser função do arranjo em planta da barragem de rejeitos, o qual deve ser compatível com a configuração topográfica. Vick (1983) define algumas categorias gerais:

- Represamento tipo anel:

A melhor locação deste tipo de arranjo é em terrenos planos, onde há ausência de depressões topográficas naturais. Requer grande quantidade de material de aterro em relação à quantidade de volume represado. Como todos os lados da estrutura são fechados, são eliminadas as contribuições externas da bacia hidrográfica, reduz-se a percolação, e só é acumulada a água da polpa que cai diretamente na barragem. Este tipo de represamento é

usualmente ordenado numa geometria regular. Na Figura 12 é apresentado esquematicamente este tipo de represamento, de tipo simples (Figura 12a) e segmentado (Figura 12b), e na Figura 13, uma aplicação real.



**Figura 12. Represamento em anel: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983).**

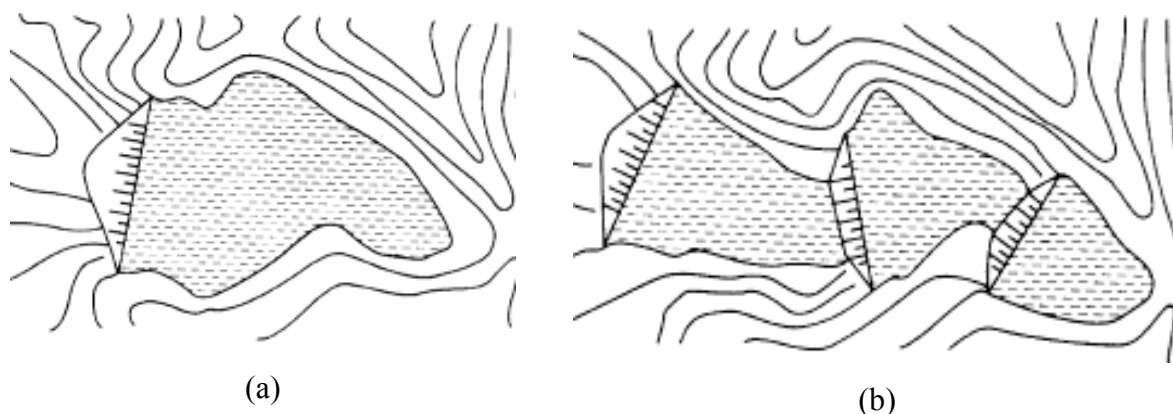


**Figura 13. Represamento em anel: vista aérea (ICME-UNEP 1998).**

- Represamento em bacia:

Na disposição espacial não difere das barragens convencionais para represamento de água: os rejeitos são confinados por uma barragem perpendicular ao fluxo da bacia. A barragem fica localizada numa única depressão topográfica, e pode-se dispor em uma ou várias etapas, conforme mostrado na Figura 14. A Figura 15 apresenta como exemplo a barragem de rejeitos de minério de ouro em Minas Gerais da empresa Rio Paracatu Mineração do grupo Rio Tinto Brasil. O mais importante para a estabilidade deste tipo de arranjo é o controle de água, tendo-

se que construir obras adicionais de drenagem a montante, para impedir a entrada de água da bacia, principalmente se os alteamentos da barragem se realizam pelo método da montante.



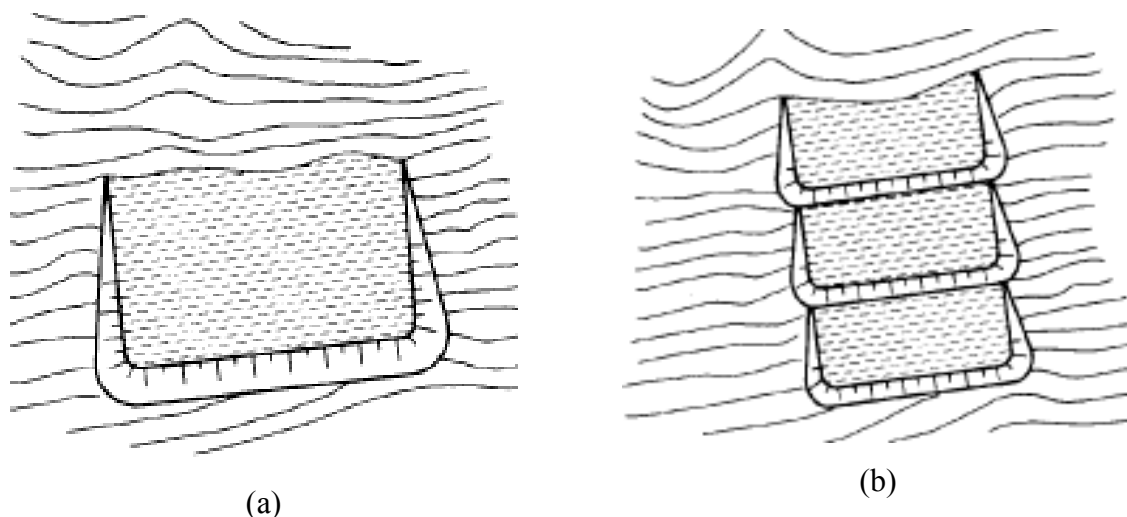
**Figura 14. Represamento em bacia: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983).**



**Figura 15. Represamento em bacia: mineração de ouro, Rio Paracatu Mineração, Minas Gerais (ICME-UNEP 1998).**

- Represamento a meia encosta:

Este arranjo pode ser usado quando não há drenagem natural na zona de deposição dos rejeitos, e quando os taludes mais íngremes da encosta têm inclinação menor do que 10%. O volume de material de aterro pode chegar a ser excessivo em relação aos volumes de deposição e armazenamento de rejeitos. Este tipo de represamento é apresentado esquematicamente na Figura 16.



**Figura 16. Represamento a meia encosta: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983).**

- Represamento em vale:

É uma combinação do represamento em bacia e a meia encosta. Este arranjo é aplicado quando o vale é muito largo, e existem nas margens áreas adequadas para a construção da barragem que não interferem com a drenagem natural. Para a construção deste tipo de represamento, deve-se desviar completamente o fluxo da zona de inundação em volta do represamento; o represamento fica na parede oposta ao canal de desvio. Na Figura 17 é apresentado esquematicamente este tipo de represamento, em uma etapa e em múltiplas etapas.

Se não ficar espaço suficiente quando é desviado o canal, é preciso realizar obras de terraplenagem na encosta, para garantir uma capacidade maior de barragem, ou realizar os alteamentos tipo anel, como é o caso da barragem de rejeitos de minério de cobre da empresa MINER S.A na Colômbia, apresentada na Figura 18.

O dique inicial deve apresentar alto fator de segurança, além de necessitar de obras de proteção no pé da barragem, já que as cheias do rio podem causar erosão e afetar a estabilidade da obra.

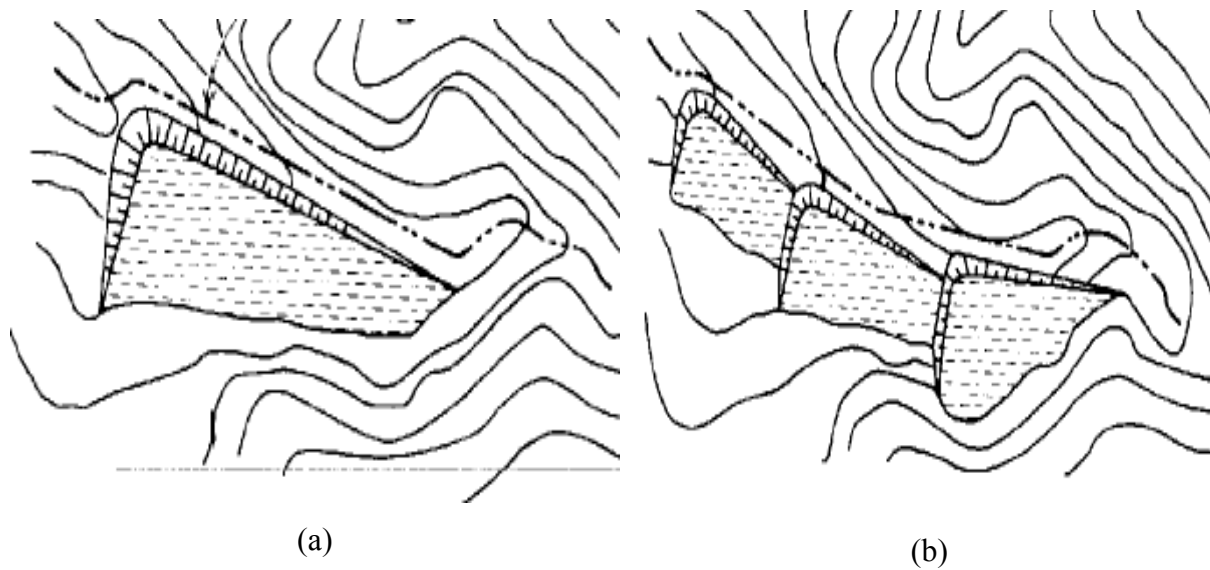


Figura 17. Represamento em vale: (a) simples. (b) múltiplos (Vick 1983).



Figura 18. Represamento em vale: mineração de cobre, MINER S.A., Colômbia.

#### 4.3 Ritcey (1989).

Os problemas ambientais, dependendo da mineralogia dos rejeitos, podem ser de anos (rejeitos com enxofre ou metais base) a centenas de anos (rejeitos de minérios de urânio).

Ritcey (1989) classifica os sistemas de projeto e tratamento global em quatro classes principais:

- Seleção do local
- Preparação e projeto do local
- Preparação física dos rejeitos
- Preparação química dos rejeitos na usina de beneficiamento.

A seleção do local para as barragens de rejeitos de mineração engloba vários aspectos, incluindo a capacidade de armazenamento, a disponibilidade do local, hidrologia, custos iniciais, facilidade de operação, condições geológicas e geotécnicas. Na Tabela 6 são apresentados os critérios que, para Ritcey (1989), tem mais relevância na escolha dos locais.

#### **4.4 Robertson et al (1980–81–82–83–99 e 2004).**

A escolha do local tem uma influência significativa nos custos operacionais da mina. Na atualidade, as normas ambientais tornaram mais complexo o processo de seleção do local, não só para sua localização, mas também para quando forem terminadas as operações da jazida. Como critérios de seleção devem ser adicionados os aspectos de recuperação ambiental e fechamento da barragem de rejeito.

A quantidade de estudos necessários para a seleção do local depende da poluição potencial a curto ou longo prazo dos rejeitos e das regulamentações regionais específicas do local da mina.

A seleção do local representa um dos instrumentos que o engenheiro dispõe para assegurar a estabilidade a longo prazo da barragem de rejeitos, e deve ser sistemático, racional e objetivo, considerando todas as variáveis de tipo quantitativo e qualitativo para obter assim a melhor decisão.

Tabela 6. Critérios para a escolha do local para implantação de uma barragem de rejeitos (Ritcey 1989).

CRITÉRIO	OBSERVAÇÕES	
SELEÇÃO DO LOCAL (dependendo da geração de potencial ácido dos rejeitos)	<p>-Depois do fechamento da barragem, o fluxo de água sobre os rejeitos deve ser mínimo.</p> <p>-Fundações de baixa permeabilidade, para reduzir percolação e poluição das águas subterrâneas.</p> <p>-Se possível, presença ou proximidade de minerais calcários, com alto teor de carbonatos nas águas subterrâneas, para haver precipitação de metais pesados das águas percoladas dos rejeitos.</p> <p>-Evitar a possibilidade de geração de ácidos em rejeitos sólidos com pirita.</p> <p>-Cuidado no projeto e construção de filtros (materiais), evitando a possibilidade de obstrução resultante da precipitação, por hidrólise, de substâncias contaminantes.</p> <p>-Efeitos negativos por alterações na permeabilidade, resistência e compressibilidade de algumas argilas pela percolação de águas com elementos quimicamente ativos.</p>	
PREPARAÇÃO DO LOCAL	<p>1. Rejeitos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Características físicas e químicas</li> <li>• Possíveis variações com o tempo</li> <li>• Viabilidade de transporte</li> <li>• Programa de volumes de disposição</li> <li>• Necessidades e/ou vantagens da mistura de diferentes rejeitos.</li> </ul> <p>2. Geologia e extração de minério</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Historia geológica e atividades atuais <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características topográficas</li> <li>▪ Potencial de riscos naturais</li> <li>▪ Informações para localizar e projetar estruturas de porte maior</li> </ul> </li> <li>• Fundações <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos de escavação e perdas</li> <li>▪ Tipo e profundidade das camadas</li> <li>▪ Resistência ao intemperismo</li> <li>▪ Resistência ao ataque ácido</li> <li>▪ Custos de escavação</li> <li>▪ Mergulho e direção das camadas afetam o fluxo de águas subterrâneas.</li> </ul> </li> </ul> <p>3. Características e viabilidade do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de solo <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residual</li> <li>▪ Glacial</li> <li>▪ Coluvial</li> <li>▪ Aluvionar</li> </ul> </li> <li>• Quantidades e locação <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cobertura natural adequada</li> <li>▪ Viabilidade como material final de cobertura</li> <li>▪ Material adequado para drenagem</li> <li>▪ Boas reservas e disponibilidade</li> <li>▪ Boa estabilidade</li> </ul> </li> <li>• Ação do intemperismo. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modificações nas características do solo com o tempo e exposição</li> </ul> </li> <li>• Mineralogia <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Troca de cátions e capacidade de renovação por lixiviação</li> </ul> </li> </ul>	<p>4. Águas superficiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Correntes, fluxos <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos iniciais altos para controle de escoamento superficial e correntes de águas</li> <li>▪ Considerar os efeitos do fluxo da água no local e nas estruturas</li> <li>▪ Desenvolver uma base de dados para controle de águas antes da deposição dos rejeitos</li> </ul> </li> <li>• Escoamento superficial <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quando possível, desviar as águas superficiais para longe da zona de deposição, com valas periféricas e tubulações de drenagem</li> <li>▪ Infiltração da água de chuva na área de deposição</li> <li>▪ Considerar o uso de material de cobertura impermeável</li> <li>▪ Manter uma declividade final dos rejeitos para rápido escoamento superficial.</li> <li>▪ Valas impermeáveis e resistentes à erosão para desvio das águas para fora da área</li> </ul> </li> </ul> <p>5. Águas subterrâneas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poluição por percolação</li> <li>▪ As medidas para remediar ou eliminar a percolação de águas lixiviadas nas águas subterrâneas são praticamente impossíveis ou muito caras.</li> <li>▪ Minimizar a contaminação de águas subterrâneas por vedação do terreno original, vedar a superfície dos rejeitos, e coletar as águas antes que entrem no sistema de águas subterrâneas.</li> </ul>

Robertson divide o processo de seleção em duas fases, a Fase 1 de avaliação preliminar, e a Fase 2 de avaliação e investigação detalhada, cada uma com suas tarefas a serem executadas, conforme descrito a seguir.

#### Fase 1: Avaliação Preliminar

- Tarefa 1: Investigação regional
- Tarefa 2: Identificação de locais
- Tarefa 3: Análise de características desfavoráveis
- Tarefa 4: Investigação dos locais restantes
- Tarefa 5: Avaliação qualitativa e classificação
- Tarefa 6: Avaliação semi-quantitativa e classificação
- Tarefa 7: Análise de custos
- Tarefa 8: Seleção de alternativas para a fase de investigação detalhada.

A avaliação preliminar normalmente pode ser feita usando mapas topográficos em escala 1:25.000, podendo ser de muita ajuda a utilização de fotos aéreas da zona a ser estudada. As informações nesta fase incluem:

- Geologia.
- Posição da mina, facilidades e infra-estrutura.
- Qualidade e produção esperada (ton/dia) de rejeitos, além do tempo esperado de produção da lavra.
- Natureza e produção de outros tipos de rejeitos ou estéreis.
- Localização de outras minas na área.
- Regulamentações de tipo ambiental
- Hidrologia, hidrogeologia, geoquímica, clima, demografia, arqueologia, ecologia, usos do solo e potenciais zonas mineralizadas na área.

#### Fase 2: Avaliação e investigação detalhada

- Tarefa 9: Investigação detalhada dos locais selecionados
- Tarefa 10: Projeto conceitual dos locais
- Tarefa 11: Avaliação dos custos e riscos de poluição de cada um dos locais
- Tarefa 12: Classificação dos locais e seleção do principal local
- Tarefa 13: Preparação do relatório e documentação para o processo de revisão

A avaliação da Fase 2 corresponde às características individuais dos locais selecionados na Fase 1. Só se tratam os elementos individuais que se relacionam na avaliação preliminar.

A seguir estão detalhadas as tarefas correspondentes à Fase 1 do processo de seleção.

### Tarefa 1: Investigação Regional

Requer-se para o estudo definir uma área entre 10 e 50 km, dependendo das especificações do projeto, e é necessário revisar sistematicamente os seguintes itens:

- As características topografias e sua influência na área de estudo
- Fatores climáticos
- Características ecológicas e uso do solo
- Condições hidrológicas
- Condições geológicas
- Possíveis zonas de mineralização (zonas com altas concentrações de minérios)

Na Tabela 7 são apresentados os critérios para excluir áreas na avaliação regional.

**Tabela 7. Critérios para excluir áreas na investigação regional.**

Característica	Critério de exclusão
Topografia	Taludes íngremes, por exemplo, taludes com mais de 15% de inclinação. Áreas de difícil acesso.
Clima	Áreas com forte exposição aos fatores eólicos. Áreas expostas a condições severas de intemperismo que podem influenciar as operações e disposição.
Usos do solo e ecologia	Áreas de recreação ou lazer. Áreas de habitat animal. Áreas com ecossistemas sensíveis ou espécies em via de extinção. Outras operações mineradoras na área. Áreas de importância arqueológica. Áreas de uso intensivo, como campos petrolíferos.
Hidrologia	Áreas de bacias hidrográficas grandes, exceto se é possível desviar as correntes. Áreas de descarga de águas subterrâneas (possibilidade de lixiviação)
Geologia	Falhas ativas. Áreas de deposição aluvial ou eólica, i.e. áreas altamente permeáveis e erodíveis. Áreas com problemas nas fundações, por exemplo, áreas cársticas dolomíticas.
Zonas de mineralização	Delimitar zonas de mineralização conhecida.

### Tarefa 2: Identificação de locais

Depois da investigação regional, todos os possíveis locais são identificados e as seguintes opções são consideradas:

- Represamento em vale
- Represamento tipo anel (ambos, vale e anel, com material de empréstimo ou rejeitos, podem ser construídos pelo método da montante, jusante ou da linha de centro)
- Deposição em “pit” ou subterrânea.
- Opções especiais, i.e. deposição submarina, em cavas e outras que dependem das características da mina.

A capacidade de armazenamento do local é importante: é melhor um local com boa capacidade do que muitos locais com pequena capacidade de deposição. A avaliação, se possível, deve ser feita nas regiões de topografia natural ótima, i.e. áreas nas quais os trabalhos de desmonte e adequação são mínimos reduzindo assim os custos gerais do projeto.

### Tarefa 3: Análise de características desfavoráveis

Uma característica desfavorável é qualquer elemento do local que pode produzir severos problemas na estrutura da barragem, ou nos elementos localizados na área do projeto. Essas características estão apresentadas na Tabela 8. A disponibilidade de fotos aéreas é de muita ajuda nesta tarefa e os locais com defeitos severos são eliminados das futuras considerações.

**Tabela 8. Critérios de investigação para identificar características desfavoráveis do local.**

Critério	Característica desfavorável
Visual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte impacto visual</li> </ul>
Uso do solo/Ecológico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espécies em perigo</li> <li>• Habitat crítico de fauna e peixes.</li> <li>• Ecossistemas únicos e sensíveis</li> <li>• Áreas importantes de recreação</li> <li>• Locais arqueológicos e históricos</li> <li>• Mineralização (fator econômico)</li> <li>• Poços de petróleo e linhas de tubulação.</li> </ul>
Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pó/erosão, alta exposição ao vento</li> <li>• Para rejeitos altamente perigosos (radioativos), proximidade de população.</li> </ul>
Percolação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundações</li> <li>• Águas subterrâneas</li> <li>• Depósito aluvionar</li> </ul>
Estabilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Topografia (taludes íngremes)</li> <li>• Falhas (ativas)</li> <li>• Área de drenagem muito grande</li> <li>• Condições das fundações pobres</li> </ul>
Operacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade (demasiado pequena)</li> <li>• Acesso (difícil)</li> <li>• Características técnicas (Não viáveis)</li> </ul>
Custo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto não viável economicamente.</li> </ul>

#### Tarefa 4: Investigação dos locais restantes

Depois da gradual eliminação de possíveis locais, a investigação dos locais restantes é feita com base nos seguintes itens:

- Volume, altura e área
- Área de represamento e especificações de volume
- Altura da barragem e volume requerido
- Volume da barragem selecionada
- Área da bacia
- Distância da mina
- Estimativa de acessos que terão que ser construídos.
- Modificação da elevação da planta de beneficiamento
- Proximidade e tamanho de assentamentos de população
- Tipo de solos e rochas das fundações e na área.
- Distância dos locais aos recursos hídricos

#### Tarefa 5: Avaliação qualitativa e classificação

Os fatores considerados para cada local estão apresentados na Tabela 9. Cada local é avaliado subjetivamente por essa lista de características, resultando em uma qualificação que vai de muito bom até muito ruim (Muito bom, bom, moderado, ruim, muito ruim), e de muito alto até muito baixo (Muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto). Situar um conceito “bom” indica uma condição boa, de boa qualidade, o impacto é baixo para essa característica do local. Um conceito muito “alto” indica um impacto alto.

#### Tarefa 6: Avaliação semi-quantitativa e classificação

Dois métodos de avaliação semiquantitativa são utilizados:

- Valoração do local baseada em aspetos visuais, uso do solo e ecologia, e fatores de operação

Às descrições qualitativas de muito bom, bom, moderado, ruim e muito ruim são dados valores numéricos de 1 até 5, respectivamente; esses valores são baseados em uma escala arbitrária baseada em dados reais do local. Por exemplo, se a característica é área de alteração e os efeitos estão entre 0 ha e 500 ha, pode-se utilizar uma escala de valores associada a intervalos de área de alteração compatíveis com o conhecimento do local: para área de

alteração entre 0 – 70 ha, valor 1; entre 70 – 130 ha, valor 2; entre 130 – 160 ha, valor 3; entre 160 – 200 ha, valor 4; e para área de 200 ha ou mais, valor 5.

**Tabela 9. Avaliação qualitativa e classificação.**

Característica	Fator considerado
Uso do solo/ecologia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas de alteração = área total de represamento + área total de acessos</li> <li>• Efeitos do detrimento a longo prazo em qualidade da vegetação, qualidade do ar, qualidade humana.</li> </ul>
Poluição do ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direção do vento</li> <li>• Área de impacto</li> </ul>
Poluição por percolação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualidade geológica natural</li> <li>• Camadas apropriadas</li> <li>• Qualidade geoquímica</li> <li>• Potencial de lixiviação</li> </ul>
Poluição superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condições da barragem e ruptura devido a: concentrações de fluxo, erosão.</li> <li>• Ruptura das fundações por liquefação, por falhas ativas.</li> </ul>
Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de armazenamento</li> <li>• Distância da mina</li> <li>• Viabilidade da construção, e materiais de recuperação.</li> <li>• Capacidade de expansão</li> <li>• Exigências de controle de superfícies de drenagem.</li> <li>• Dificuldades de operação (clima, acessos, etc.).</li> </ul>
Sistemas de deposição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Úmido, seco, semi-úmido.</li> </ul>

Para as características de visibilidade, uso do solo/ecologia e fatores operacionais, usa-se esse tratamento, encontra-se a média dos valores e esses dados são colocados numa tabela resumo.

- Valoração do local baseado em fatores de risco e poluição

Os mecanismos de liberação de agentes poluentes podem-se classificar em três grandes categorias, resumidas na Tabela 10, que são os mecanismos de poluição do ar, percolação e lixiviação e transporte físico de poluentes.

O risco de poluição de cada um dos mecanismos anteriores depende de três variáveis:

- A probabilidade de ocorrência (L)
- A magnitude da poluição quando ocorre (M).
- Os fatores de mitigação reduzindo os potenciais impactos quando a poluição ocorre (Mit)

**Tabela 10. Mecanismos de poluição.**

Característica	Mecanismo de poluição
Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispersão de partículas/erosão eólica</li> <li>• Emissão de gases</li> </ul>
Percolação/lixiviação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lixiviação devido a superfícies de infiltração e águas subterrâneas</li> <li>• Percolação</li> </ul>
Transporte físico de poluentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derramamento durante o transporte</li> <li>• Concentração de fluxo de água (inundação/erosão profunda produzida pela água)</li> <li>• Erosão por percolação de água</li> <li>• Ruptura da barragem</li> <li>• “Overtopping” durante a operação da barragem</li> <li>• Dispersão à população, animais e plantas.</li> </ul>

Robertson (1980) determina o risco de poluição pela equação(1):

$$\text{Risco de poluição} = \frac{L * M}{Mit} \quad (1)$$

Dá-se à probabilidade um valor de 1 a 5, denotando 1 como muito baixa probabilidade e 5 como muito alta probabilidade. A magnitude também é quantificada de 1 a 5, sendo 1 correspondente a magnitude muito pequena e 5 a uma muito grande; o mesmo se aplica à mitigação, 1 denotando mitigação não apreciável e 5 denotando alta mitigação.

#### Tarefa 7: Análise de custos

As análises de custos preliminares são realizadas para cada local separadamente, mas um orçamento exato e completo fica fora das expectativas da avaliação preliminar e é feita na Fase 2 do projeto. Os custos preliminares, avaliando alguns aspectos de importância quando for necessário, são de utilidade para decidir qual alternativa específica deve ser detalhada. Podem ser levados em conta para esta avaliação preliminar aspectos como: métodos prováveis de construção, deposição dos rejeitos (úmido, semi-úmido e seco), custos de mão de obra e equipamento. Porém, não deve ser um indicativo dos verdadeiros custos do projeto, pois a engenharia em detalhe da Fase 2 para os locais específicos é a mais importante.

#### Tarefa 8: Seleção de alternativas para a fase de investigação detalhada

As tabelas resumos das Tarefas 6 e 7 são utilizados para a seleção dos locais que passarão à Fase 2 do projeto.

Robertson e Shaw (1999, 2004) modificaram um pouco a valoração das propriedades de alguns elementos de seleção, além de mudar a escala numérica que Robertson (1980, 81, 82,

83) aplicava para valorar as propriedades qualitativas de alguns aspetos (escala de valoração de 1 a 5).

Para Robertson e Shaw (1999, 2004) a seleção dum local para armazenamento de rejeitos é uma das primeiras etapas que as empresas mineradoras deverão contemplar. Os locais de armazenamento de rejeitos não oferecem retorno econômico à companhia e requerem controle e conservação durante e depois da etapa de fechamento da mina. Existirão riscos em longo prazo de tipo ambiental e econômico associados a quaisquer estruturas de contenção de rejeitos de mineração. Maximizar segurança e minimizar os custos implica uma avaliação de alternativas de projeto do ponto de vista administrativo de perdas e benefícios. Para isto, é necessário desenvolver três etapas básicas:

- Identificar os impactos (benefícios e perdas) que deverão ser incluídos na avaliação.
- Quantificar os impactos (benefícios e perdas).
- Valorar os impactos, combinados ou acumulados, para cada opção e compará-los com outras opções; assim se desenvolve uma lista com valor, escala e peso, de preferências das opções.

Nestas três etapas, podem participar diferentes organizações (empresariais, sociais, agências ambientais) com pontos de vista diferentes, que se podem agrupar em uma escala de valores. A metodologia aplicada por Robertson e Shaw (1999, 2004) é chamada “Multiple Accounts Analysis” (MAA), que utiliza uma escala de valores de 1 a 9, onde 1 é muito desfavorável e 9 muito bom. A metodologia avalia e valora para cada local, uma estrutura principal e uma sub-estrutura de características que influenciam a seleção do mesmo. Depois da quantificação o maior valor, é então, a melhor opção. Esta metodologia não é alvo desta pesquisa, mas o interessante é a estrutura de características que apresenta, que consta da Tabela 11, trazendo assim mais elementos de avaliação na escolha do local:

**Tabela 11. Estrutura de avaliação MAA.**

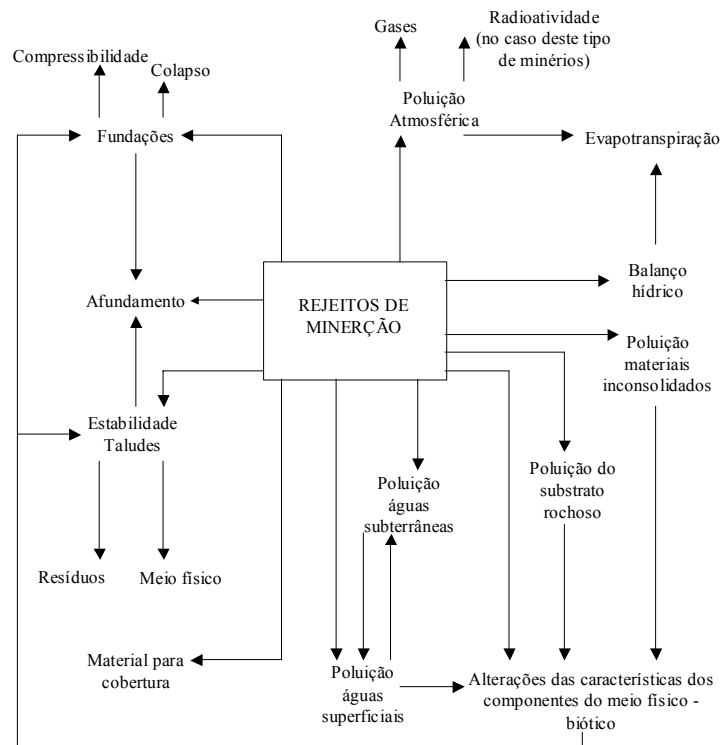
Estrutura principal	Sub-estrutura
Elementos Técnicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barragens</li> <li>• Mina</li> <li>• Desvios de rios</li> <li>• Revestimentos - Coberturas</li> <li>• Tratamento das águas</li> <li>• Acessos</li> </ul>
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> <li>• Qualidade do ar</li> <li>• Hidrologia e controle de águas</li> <li>• Qualidade de água</li> <li>• Ecologia</li> <li>• Solos</li> <li>• Vegetação</li> <li>• Fauna</li> </ul>
Econômicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos de capital</li> <li>• Custos operacionais</li> <li>• Custos de fechamento ou abandono</li> <li>• Juros / impostos</li> <li>• Risco econômico</li> </ul>
Sócio – econômico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingressos (diretos / indiretos)</li> <li>• Impostos (diretos / indiretos)</li> <li>• Desenvolvimento governamental regional</li> <li>• Gastos governamentais</li> <li>• Análise de mercado de trabalho</li> <li>• População</li> <li>• Aldeia, vila, cidade.</li> <li>• Saúde e segurança</li> <li>• Propriedade da terra</li> <li>• Recursos hídricos navegáveis</li> <li>• Transporte e tráfego</li> <li>• Turismo, recreação</li> <li>• Estética</li> <li>• Arqueologia, locais tradicionais.</li> </ul>

#### 4.5 Zuquette e Gandolfi (2004), Liporaci e Zuquette (1995).

Baseado em mapas geotécnicos, os autores apresentam atributos mais específicos para a disposição de resíduos, sendo o primeiro trabalho direcionado à de seleção de locais para aterros sanitários e o segundo para a disposição de rejeitos de mineração. Os atributos definidos na escolha de locais para aterros sanitários são uma excelente base para a seleção de locais de rejeitos de mineração. Mesmo que os resíduos (lixo ou rejeito) sejam diferentes, as condições gerais para a seleção dos locais apresentam características que servem na escolha do local para barragens de rejeitos.

Zuquette e Gandolfi (2004) apresentam um esquema dos aspetos técnicos que relacionam o aterro sanitário com o meio ambiente que é facilmente aplicável a barragens de rejeitos, já que

os rejeitos, como os resíduos, constituem uma fonte de poluição que contamina diretamente o meio físico (materiais inconsolidados, águas sub e superficiais e substrato rochoso), e que a contaminação varia não só em função da quantidade do rejeito ou lixo, mas principalmente quanto ao tipo. Na Figura 19 se apresenta o esquema voltado a barragens de rejeitos



**Figura 19. Aspectos técnicos que relacionam a barragem de rejeito e o meio ambiente. (Fonte: Zuquette-Gandolfi 2004, Modificado).**

Os autores propõem, com base nas relações da Figura 19, uma lista de atributos que devem ser considerados nos procedimentos de seleção de locais para disposição de resíduos. Estes atributos são apresentados em nível geral, e se definem classes associadas a intervalos quanto ao grau de restrições de meio físico, como se observa na Tabela 12.

**Tabela 12. Atributos para definição e delimitação de unidades do meio físico visando à seleção de áreas para disposição de resíduos.**

Componente	ATRIBUTO	PARÂMETRO	CLASSES			
			Favorável	Moderada	Severa	Restritiva
Substrato Rochoso		-Resistência Mecânica -Mineralogia -Cimentação -Arranjo	Gnaisses, migmatitos, siltitos e argilitos	Granitos	Conglomerados	Arenitos
	Profundidade (m)		>15	5-10	<5	<3
Materiais Inconsolidados	Descontinuidade (juntas/m <sup>3</sup> )	Contador volumétrico de juntas (JV)	<3	3-30	>30	>60
	Classificação textural	ASTM (1994)	Areia argilosa	Argila arenosa	Arenosa	Muito arenosa
	Variação vertical		Heterogêneo	Heterogêneo	Homogêneo	Homogêneo
	Mineralogia	Argilominerais. Minerais inertes	Argilominerais 2X1	Argilominerais 1X1	Minerais inertes	Minerais inertes
	Matacões	Tamanho (maior dimensão)	Não	< 1m	1 a 2m	> 2m
		Frequência		2/1000m <sup>3</sup>	2 a 5/1000m <sup>3</sup>	>5/1000m <sup>3</sup>
		Profundidade		> 2m	< 2m	< 0.5m
	pH/ Δ pH(*)		>4/negativo	>4/negativo	>5/negativo	<5/positivo
	Salinidade (mhos/cm)	Condutividade elétrica	<16	<16	>16	Alto
	Capacidade de Troca Catiônica (C.T.C) (meq/100g)		>15	5 – 15	<5	<2
	Camada compressível	Espessura profundidade	Não	Não	Camada superficial	Camada superficial
	Material colapsível	Espessura profundidade	Não	Camada superficial (2m)	Camada superficial (4m)	Camada superficial (6m)
	Índice de erodibilidade		Baixo	Baixo	Alto	Muito alto
	Fator de retardamento		Alto	Intermediário	Baixo	Baixo
Características de compactação	Proctor normal	adequada	adequada	inadequada	inadequada	
Água	Profundidade de zona saturada (m)	Metros	>10	>6	<4	<2
		Variações anuais	<1	<1	1 a 2	>1
	Direção do fluxo saturado	Numero de direções	1	1	2 ou 3	>3
	Fluxo superficial		laminar	laminar	Laminar/concentrado	Concentrado

	Condutividade hidráulica (cm/s)		$<10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$>10^{-3}$	Muito alta ( $>10^{-2}$ )
	Áreas de recarga		Não	Não	Não	Ocorre
	Distância da nascente (m)		$>500$	400 – 500	400 – 300	$<300$
	Drenagem	Carta específica	Adequada	Adequada	inadequada	inadequada
<b>Processos (feições)</b>	Erosão	Frequência	Não	Não	Susceptibilidade	Alta susceptibilidade
		Intensidade			$1/\text{km}^2$	$>5/\text{km}^2$
	Movimentos de massa gravitacionais	Frequência	Não	Não	Susceptibilidade e.	Ocorre
		Intensidade			$<3/\text{km}^2$	$>3/\text{km}^2$
	Subsidências	Frequência	Não	Não	Não	Ocorre
		Intensidade				$1/\text{km}^2$
	Processo cársticos	Frequência	Não	Não	Não	Ocorre
		Intensidade				$1/\text{km}^2$
Zonas de inundação	Frequência (intensidade área afetada)	Não	Não	Período de retorno entre 20 e 50 anos	Período de retorno $< 20$ anos	
<b>Relevo</b>	Formas de relevo		Encostas planas (inclinação $<15^\circ$ )		Encostas íngremes (inclinações 45 a $60^\circ$ ). Zonas marginais de inundação	Zonas marginais de inundação
	Distância do limite entre bacias hidrográficas		$>200\text{m}$	Entre 200m e 100m	$<100\text{m}$	Coincidente
	Zonas úmidas		Não	Não	Não	Ocorre
	Declividade (%)		2 – 5	$>5, <2/5$	$>15$	$>20$
<b>Características climáticas</b>	Evapotranspiração	Total anual	Alto ( $<1000\text{mm}$ )	Intermediário (800 – 1000mm)	Baixo (800 – 600 mm)	Muito baixo ( $<600\text{mm}$ )
	Direção do vento					Em direção à zona urbana
	Pluviosidade (mm)	Total anual			$>200\text{mm/ano}$	$>3000\text{mm/ano}$

\*  $\Delta \text{pH} = \text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$

#### 4.6 Tabela Resumo.

Com os fatores que influenciam a seleção de locais para barragens de rejeitos anteriormente descritos, formulou-se o quadro comparativo da Tabela 13. O objetivo da tabela resumo é determinar os parâmetros adotados para a análise e avaliação das diferentes alternativas na seleção dos locais por diversos autores, com base na sua experiência profissional.

**Tabela 13. Tabela Resumo por autor.**

CRITÉRIOS E INDICADORES		BRAWNER E CAMPBELL (1973)	VICK (1981 – 1983)	RITCEY G.M, (1989)	MacG ROBERTSON (1980 – 2004)	LIPORACI – ZUQUETTE (1995) ZUQUETTE GANDOLFI (2004)
ASPETOS ECONÔMICOS			-Custos operacionais	-Custos iniciais	- Custos de capital - Custos operacionais - Custos de fechamento ou abandono -Juros / impostos - Risco econômico	
ASPETOS TOPOGRÁFICOS	RELEVO.	- Estudo de mapas topográficos.		Características topográficas.	CRITÉRIO DE EXCLUSÃO: -Taludes íngremes, por exemplo, taludes com mais de 15% de inclinação.	-Formas de relevo - Distância do limite entre bacias hidrográficas - Zonas úmidas - Declividade (%)
	TIPO DE ARRANJO DA BARRAGEM		- Represamento tipo anel -Represamento numa bacia -Represamento a meia encosta -Represamento em vale		- Represamento em vale -Represamento tipo anel (ambos, vale e anel, com material de empréstimo ou rejeitos, podem ser pelo método da montante, jusante ou da linha de centro) -Deposição em “pit” ou subterrânea. -Opções especiais, i.e. deposição submarina, em cavas e outras que dependem das características da mina	
	MINA		- Local e elevação relativa da usina de beneficiamento		-Posição da mina, facilidades e infra-estrutura. - Localização de outras minas na área. - Distância da usina.	
ASPETOS GEOLÓGICOS / GEOTÉCNICOS		- Comportamento geral dos solos, fundações e rochas. - Localização quantidades e tipo de materiais de empréstimo.	- Viabilidade de materiais de empréstimo, tipos e quantidades, teor de umidade. - Perdas por percolação, permeabilidades. - Estabilidades nas fundações - Falhas, sismicidade, estruturas de retenção.	- Geologia e extração de minério - Fundações: -Custos de escavação e perdas -Benefícios da resistência à erosão na construção -Local, tipo e profundidade das camadas. -Resistência ao intemperismo. -Resistência do ataque ácido. -Custos de escavação -Mergulho e direção da camada, afeita o local e o fluxo de águas subterrâneas. - Tipo de solo (residual, glacial, coluvial, aluvionar), quantidades e locação. - Mineralogia.	CRITERIOS DE EXCLUSAO: - Falhas ativas. - Áreas de depósito aluvial ou eólico, i.e. áreas altamente permeáveis e erodíveis. - Áreas com problemas nas fundações (por exemplo, áreas cársticas dolomíticas).  - Delinear zonas de mineralização conhecida - Tipo de solos e rochas das fundações e na área - Percolação.	-Litologia: Resistência mecânica, mineralogia, cimentação, arranjo, profundidade - Materiais inconsolidados: Descontinuidades, classificação textural, variação vertical, matações, pH, salinidade, capacidade de troca catiônica, camada compressível, material colapsível, índice de erodibilidade, fator de retardamento, características de compactação.
	PROCESSOS (FEIÇÕES)			- Potencial de riscos naturais - Ação do intemperismo.	- Processos cársticos - Erosão por percolação.	- Erosão - Movimentos de massa gravitacionais - Subsídências. - Processos cársticos. - Zonas de inundação.

CRITÉRIOS E INDICADORES		BRAWNER E CAMPBELL (1973)	VICK (1981 – 1983)	RITCEY G.M, (1989)	MacG ROBERTSON (1980 – 2004)	LIPORACI – ZUQUETTE (1995) ZUQUETTE GANDOLFI (2004)
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS		Condições das águas subterrâneas, percolação.	- Vazão e direção de percolação -Potencial de contaminação.	- Poluição por percolação: -Remediar ou eliminar a percolação de águas lixiviadas. -Minimizar a contaminação	- Áreas de descarga de águas subterrâneas (possibilidade de lixiviação). - Poluição por percolação: qualidade geológica natural, camadas apropriadas, qualidade geoquímica, potencial de lixiviação devido a superfícies de infiltração.	
HIDROLOGIA E ÁREA DE CAPTAÇÃO			- Tempo de acumulação de água suficiente para permitir a sedimentação. - Exigências de manejo de inundações	- Correntes, fluxos: -controle de escoamentos superficiais e correntes de águas. -efeitos de fluxo da água no local e nas estruturas -controle de águas antes da deposição dos rejeitos. - Escoamento superficial: -desviar as águas da superfície longe da zona de deposição (valas periféricas, tubulações de drenagem). - Infiltração da água de chuva na área de deposição: -Uso de material de cobertura impermeável. -Manter um nivelamento final dos rejeitos -Valas impermeáveis e resistentes.	CRITÉRIO DE EXCLUSÃO: - Excluir áreas de bacias hidrográficas grandes, exceto, se é possível desviar as correntes.	- Profundidade de zona saturada. - Direção do fluxo saturado. - Fluxo superficial. - Condutividade hidráulica. - Áreas de recarga. - Distância da nascente. - Drenagem.
ASPETOS CLIMÁTICOS		- Analise climatológica e registro de escoamento superficial	- Taxa anual de precipitação e evaporação.		CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO: - Áreas com forte exposição aos fatores eólicos. - Áreas expostas a condições severas de intemperismo. - Ar: Pó/erosão, alta exposição ao vento (rejeitos radioativos), proximidade de população. MECANISMO DE POLUIÇÃO: Direção do vento, dispersão de partículas / erosão eólica,	- Evapotranspiração, direção do vento, Pluviosidade
ASPETOS OPERACIONAIS	DOS REJEITOS	- Quantidade de rejeitos produzidos - Velocidade de deposição.		- Características físicas e químicas - Possíveis variações com o tempo - Viabilidade de transporte - Programa de volumes de disposição - Necessidades e/ou vantagens da mistura de diferentes matérias de rejeitos.	- Qualidade e produção esperada (ton/dia) de rejeitos, além do tempo esperado de produção da lavra. - Natureza e produção de outros tipos de rejeitos ou estéreis.	
	DO LOCAL	-Volumes de armazenamento		- Capacidade de armazenamento	- Acesso (difícil) - Características técnicas (Não viáveis) -Capacidade de armazenamento - Distância da mina - Viabilidade da construção, e materiais de recuperação. - Capacidade de expansão - Exigências de controle de superfícies de drenagem.	

CRITÉRIOS E INDICADORES	BRAWNER E CAMPBELL (1973)	VICK (1981 – 1983)	RITCEY G,M, (1989)	MacG ROBERTSON (1980 – 2004)	LIPORACI – ZUQUETTE (1995) ZUQUETTE GANDOLFI (2004)
USOS DO SOLO E ECOLOGIA				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas de recreação ou lazer.</li> <li>- Áreas de habitat animal.</li> <li>- Propriedade da terra.</li> <li>- Áreas com ecossistemas sensíveis</li> <li>- Outras operações mineiras na área.</li> <li>- Áreas de importância arqueológica.</li> <li>- Áreas de uso intensivo.</li> <li>-Áreas de alteração = área total de represamento + área total de acessos</li> <li>- Efeitos do detrimento em longo prazo em qualidade da vegetação, qualidade do ar, qualidade humana.</li> </ul>	
ASPEITO SÓCIO – ECONÔMICO				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ingressos (diretos / indiretos)</li> <li>- Impostos (diretos / indiretos)</li> <li>-Desenvolvimento governamental regional</li> <li>- Gastos governamentais</li> <li>-Análise de mercado de trabalho</li> <li>- População</li> <li>- Aldeia, vila, cidade.</li> <li>- Saúde e seguridade</li> <li>- Propriedade da terra</li> <li>- Recursos hídricos navegáveis</li> <li>- Transporte e tráfego</li> <li>- Turismo, recreação.</li> <li>- Estética</li> <li>-Arqueologia, locais tradicionais.</li> </ul>	

## 5 MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA.

Inicialmente são feitas algumas considerações sobre os métodos de tomada de decisões e a seguir apresenta-se o método de análise hierárquica.

### 5.1 Métodos multicriteriais de auxílio à tomada de decisões.

A seleção de uma área para a construção de uma barragem de rejeitos é um processo de avaliação que abrange uma grande quantidade de variáveis (ver Tabela 13), necessitando de um método que estruture o problema e facilite sua visualização. A utilização de um método multicriterial de auxílio à tomada de decisão se justifica pelo fato de considerar critérios quantitativos e qualitativos simultaneamente na análise e ao mesmo tempo incorporar a experiência e a preferência dos tomadores de decisão. Assim, a escolha será bastante consistente e confiável (Lisboa 2002).

Clemen (1991) considera que o propósito da análise de decisão é ajudar o tomador de decisões a pensar sistematicamente a respeito de grandes problemas e melhorar a qualidade das decisões, sendo que há quatro fontes de fatores que dificultam a tomada de decisão:

- Complexidade do problema
- Incertezas que envolvem as circunstâncias
- Tratar vários objetivos num mesmo problema
- Uma ou várias perspectivas que conduzam a conclusões adversas (o resultado não é sistematicamente o mesmo)

Para Baasch (1995), nos processos multicriteriais existe um tomador de decisões (ou vários), que toma a decisão e opera segundo um esquema seqüencial de fases, que não é estático e nem linear, que pressupõe realimentações, revisões e formulações no decorrer do processo. As etapas básicas do processo de tomada de decisões seriam:

- Definição das ações potenciais ou desejáveis a serem analisadas
- Formulação dos critérios de análise
- Avaliação das ações com base em cada critério
- Agregação final.

Para Pomeranz (1992), um método multicriterial é definido pelas seguintes etapas:

- Formulação de alternativas
- Escolha de critérios e indicadores
- Avaliação das alternativas segundo os critérios e indicadores escolhidos (avaliação parcial)
- Agregação das avaliações parciais.

Através da avaliação parcial aprecia-se o grau de alcance dos objetivos do projeto expressos pelos critérios.

Carvalho (1996) propõe que um problema de decisão se apóie num processo lógico de auxílio à decisão, construído no âmbito da teoria da análise de decisão, e das várias pautas envolvidas na estruturação do problema:

- A construção do modelo de decisão compreende a identificação das variáveis intervenientes no problema, a caracterização das relações lógicas entre essas variáveis e a expressão dessas relações em termos matemáticos formais.
- Estabelecer as condições de contorno do problema, ou seja, da área objeto de intervenção e das alternativas de intervenção viáveis.
- Listar tipos de conseqüências que serão consideradas e estabelecer uma unidade de medida comum que possibilite compará-las em relação a critérios que especifiquem a preferência do decisor.
- Representar relações por meio de árvores de decisão, apresentando interdependências existentes entre as variáveis do problema.
- Estabelecer o critério de decisão.

De acordo com Scholl et al. (2004), alguns dos problemas de decisão têm as seguintes propriedades:

- As alternativas são caracterizadas por um número limitado de atributos relevantes e operacionais.
- Os atributos podem ser medidos numa escala arbitrária e representados por um número limitado de níveis discretos (por exemplo, distância grande, média ou pequena; desempenho bom, médio ou fraco).
- Os atributos são escolhidos de maneira que sejam independentes um de outro. O juízo de valor dum nível de atributo deve ser independente dos outros níveis que outros atributos

possam ter. As alternativas possíveis podem ser construídas por combinações (quase) arbitrárias de níveis de diferentes atributos; particularmente, não devem ser estritamente correlacionadas estatisticamente.

- No entanto, os atributos são (parcialmente) conflitantes, i.e., melhorar o nível de um atributo deteriora o nível de pelo menos um outro.
- As alternativas que um tomador de decisões tem que avaliar são definidas por todas as possíveis combinações de níveis de atributo.

Os métodos multicriteriais são classificados em três grandes famílias: a teoria da utilidade multiatributo (enfoque do critério único de síntese, que exclui a incomparabilidade), os métodos de alta ordem (que aceitam a incomparabilidade) e os métodos iterativos (com interação tentativa-erro).

A primeira família (teoria da utilidade multiatributo) mostra como considerar conseqüências diferenciadas (ambiental, monetário ou social) por meio de uma função utilidade com atributos múltiplos. O processo transforma os valores das diversas conseqüências em unidades de utilidade, utilizando-se para essa transformação, as preferências do decisor codificadas através de mecanismos formais. A utilização da teoria de utilidade multiatributo aplicada ao gerenciamento de encostas foi apresentada detalhadamente por Carvalho (1996).

Os métodos de alta ordem (“outranking”) usam índices que medem a credibilidade da concordância ou discordância com a hipótese que uma alternativa  $i$  supera uma alternativa  $j$ . A concordância permite medir se uma ação  $i$  é melhor que outra  $j$  pelo cálculo do peso total dos critérios a favor de  $i$ . A discordância é usada para respeitar a situação de ordenamento de  $i$  sobre  $j$ , quando existe um critério para o qual  $j$  é muito melhor que  $i$ . Esta metodologia se baseia numa relação binária, onde a qualidade das avaliações das ações e a natureza do problema permitem admitir que  $i$  é ao menos tão boa quanto  $j$  sem que haja uma razão importante para recusar esta afirmação. Estes métodos são mais aconselháveis quando o número de ações não é muito grande (Baasch 1995). A utilização de um método de alta ordem aplicado à escolha do melhor traçado de rodovias foi apresentada detalhadamente por Galves (1995).

Esta pesquisa está centrada na última família, onde se encontra o método de análise hierárquica (AHP – “Analytic Hierarchy Process”).

## **5.2 Conceituação do Método de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process – AHP).**

O método de análise hierárquica foi introduzido por Thomas Saaty em 1977, e busca reproduzir o que parece ser um método natural de funcionamento da mente humana. A mente humana, ao encarar um grande número de elementos controláveis ou não, que abarca uma situação complexa, os junta em grupos segundo propriedades comuns.

O método inicialmente foi desenvolvido para solucionar um problema de planejamento de contingência em 1972, e a partir daí foi aplicado em vários outros projetos, até ganhar notoriedade através do livro “The Analytic Hierarchy Process”, publicado em 1980. Desde então, tem tido aplicações ainda mais abrangentes, incluindo problemas econômicos/gerenciais (finanças, previsão macro-econômica, estratégia, planejamento, alocação de recursos, transporte, recursos hídricos), problemas políticos (controle de armas nucleares, conflitos e negociação, influência mundial), problemas sociais (educação, meio ambiente, saúde, jurídico, medicamentos), problemas tecnológicos (seleção de mercados, transferência tecnológica), entre outros (Morita 1998).

A grande vantagem do método é alternar etapas de cálculo com etapas de diálogo, ou seja, pressupõe uma intervenção contínua e direta do decisor ou de outros atores na construção da solução, e não somente na definição do problema (Baasch 1995). Quando vários objetivos são importantes para o decisor, pode ser difícil escolher entre as alternativas; neste caso o método de análise hierárquica é um instrumento que pode resolver problemas complicados onde os objetivos têm interações e correlações.

No AHP, as alternativas e os atributos, necessários para julgar as alternativas, se estruturam em uma hierarquia. No nível mais elevado fica o principal objetivo do problema de decisão. O objetivo principal deve ser decomposto em vários níveis inferiores de atributos; cada atributo pode ser subdividido, gerando uma árvore de atributos com um número arbitrário de níveis. A subdivisão termina quando se determina que os atributos são avaliadores dos objetivos dos níveis acima da árvore. Abaixo dos atributos elementares são colocadas as alternativas.

O cálculo da hierarquia é realizado de maneira ascendente. O tomador de decisões compara todos os pares de atributos em cada nível, começando pelos atributos elementares e subindo pela hierarquia até atingir o objetivo final (Saaty 1980). As preferências são encontradas por

comparações paritárias, ou par a par (“pairwise”), das alternativas para cada atributo, usando uma escala de valor. A mesma escala é usada para determinar os pesos dos atributos por comparações paritárias dos critérios que têm o mesmo objetivo. As preferências das alternativas com respeito a seus níveis do atributo, chamadas prioridades, e os pesos dos atributos são calculados usando o método do autovalor (“eigenvalue”). A prioridade final ou total é computada por uma função de valor aditivo que resume as prioridades dos níveis de atributos.

Segundo Saaty (1980) e Morita (1998), as etapas da aplicação do AHP são divididas em:

- Estruturar os objetivos, critérios e alternativas em uma hierarquia, do problema global até os estágios mais específicos.
- Realizar os julgamentos comparativos de cada par de fatores de decisão (os fatores de decisão são alternativas, indicadores e critérios) em um dado nível, denominados comparações paritárias.
- Determinar as prioridades relativas dos pesos dos fatores de decisão, em cada nível ou grupo. Consolidar as prioridades relativas até o nível das alternativas, i.e. relacionar todos os pesos, propagando o efeito dos pesos na estrutura até o nível das alternativas. A recomendação da decisão é dada pela classificação das alternativas da decisão, ordenadas relativamente ao objetivo global.
- Uma etapa adicional é a verificação do nível da consistência dos dados de julgamentos de cada grupo.

A seguir serão detalhadas as etapas de desenvolvimento do AHP.

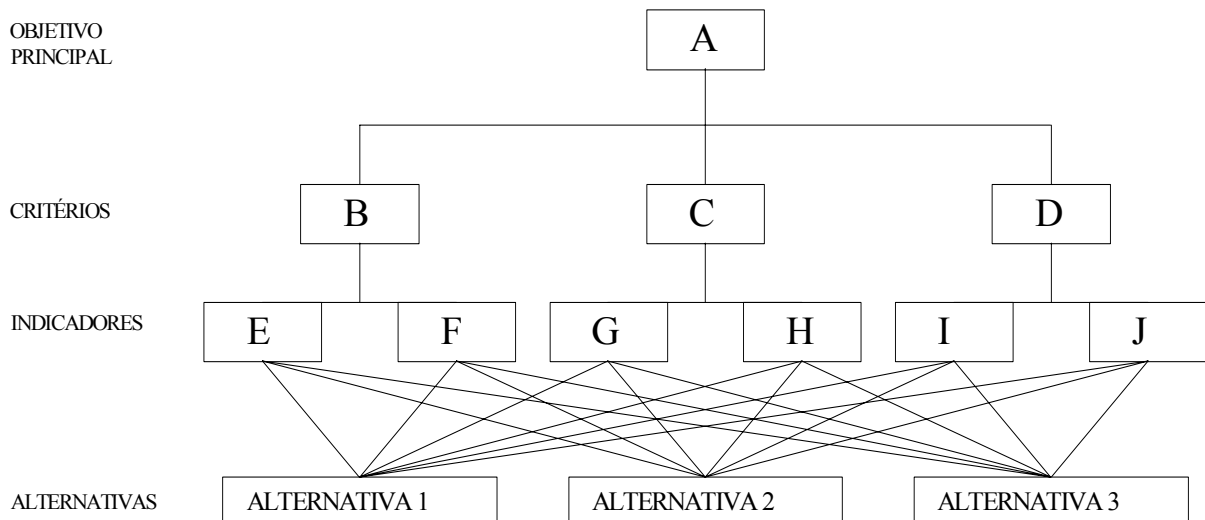
### **5.3 Estruturação da hierarquia.**

O método de análise hierárquica se caracteriza por dividir um problema de decisão através do seu ordenamento em níveis hierárquicos. De um problema complexo, com múltiplos critérios, pode-se estruturar uma hierarquia com inúmeros níveis, fixando-se o objetivo principal do problema no primeiro nível, a definição dos critérios no segundo nível, e assim por diante.

A hierarquia pode ser definida como um sistema de níveis estratificados, cada um consistindo de diversos elementos ou fatores, ou como uma abstração da estrutura de um sistema para

estudar as interações funcionais de seus componentes e respectivos impactos no sistema total (Baasch 1995).

Assim, o tomador de decisões deverá formular um objetivo global único, e dividir o sistema com critérios e indicadores atingindo esse objetivo. Na Figura 20 é apresentada uma estrutura hierárquica em forma de árvore invertida apresentada por Morita (1998), onde o objetivo único é representado pelo nó A e os critérios e indicadores apresentam-se nos níveis mais baixos; no ultimo nível da hierarquia estão as alternativas a serem ordenadas pelo método de análise. As alternativas devem estar, necessariamente, em um único nível. Um nó é um fator de decisão que pode ser um objetivo, critério ou alternativa.



**Figura 20. Modelo de hierarquização para avaliação de alternativas (Morita 1998).**

Os grupos se caracterizam por estarem conectados a um mesmo elemento do nível imediatamente superior. Na Figura 20, os critérios B, C e D formam um grupo; os elementos E, F formam um grupo; G e H formam outro; e I, J também.

Os problemas e os sistemas são estruturados com base na somatória de experiências dos integrantes do grupo de decisão, que de maneira organizada listam as considerações, os critérios, os respectivos indicadores e os atores, concluindo por elaborar uma hierarquia; isto pode ser feito em reuniões “brainstorming” (Lisboa 2002). Os integrantes do grupo de decisão podem ter papéis ativos ou passivos, como decisores, informadores, executores, especialistas

ou analistas, modeladores, vítimas, beneficiários, donos de processos e parceiros, e podem atuar em todo o processo de julgamento ou apenas em parte do mesmo.

De acordo com Morita (1998), três é o número mínimo de níveis possíveis no AHP e apenas os critérios podem ter vários níveis; quando os critérios ocupam mais de um nível os critérios inferiores são mais específicos do que aqueles que se encontram acima. Desta forma, a estruturação da hierarquia é chamada, às vezes, de estruturação de critérios.

#### 5.4 Julgamentos paritários.

O princípio básico da AHP é atribuir valores de julgamentos relativos por comparações de elementos paritariamente, isto é, dois a dois. Elementos são os fatores de decisão, que na árvore estão representados por nós do mesmo nível. Saaty (1980) utiliza uma escala de 1 a 9 para dar um valor quantitativo de um elemento preferido relativamente a outro elemento. Na Tabela 14 estão apresentados esses valores e seu significado.

**Tabela 14. Escala de julgamento paritário (Saaty 1999).**

Intensidade	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Os dois critérios contribuem
3	Importância pequena de uma sobre outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério em relação a outro
5	Importância forte ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação a outro
7	Importância muito forte ou demonstrada	Um critério é fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro com mais alto grau.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
Recíprocos dos valores acima de zero	Se atividade $i$ recebe uma das designações acima de zero, quando comparada com a atividade $j$ , então $j$ tem valor recíproco quando comparada com $i$	Uma designação razoável
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos para completar a matriz

O resultado dessas comparações é uma matriz de comparações paritárias ou matriz pareada, resultante dos julgamentos de um nível sob um determinado critério/indicador de decisão do nível imediatamente superior. A matriz tem a forma apresentada na equação (2):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde  $a_{ij}$  indica quanto mais importante é o elemento  $i$ -ésimo em relação ao elemento  $j$ -ésimo segundo a escala da Tabela 14.

As matrizes de comparações paritárias devem ser positivas, idênticas, recíprocas e consistentes (Saaty 1999), atendendo a três propriedades especiais:

- **Identidade:** todos os elementos na diagonal da matriz de comparações paritárias são iguais a 1, ou seja, para todo  $i$ , é necessário que  $a_{ii} = 1$ . Isto porque a diagonal principal representa cada elemento comparado a si mesmo, ou seja, de igual importância.
- **Reciprocidade:** cada elemento abaixo da diagonal da matriz de comparações paritárias é igual ao inverso do elemento correspondente acima da diagonal, isto é,  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . Por exemplo, se o atributo  $A$  é julgado 2 vezes mais importante do que o atributo  $B$ , então o atributo  $B$  tem  $1/2$  da importância do atributo  $A$ .
- **Consistência:** a matriz de comparações deve satisfazer a propriedade de transitividade, o que significa que se  $i$  é preferível a  $j$  e  $j$  é preferível a  $k$ ,  $i$  é preferível a  $k$ , ou seja,  $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}$ ,  $i, j, k = 1, \dots, n$ . Por exemplo, para quaisquer três atributos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , se  $A$  é julgado como  $x$  vezes mais importante que  $B$ , e  $B$  é considerado como  $z$  vezes mais importante que  $C$ , então  $A$  deve ser  $xz$  vezes mais importante que  $C$ . Segundo essa propriedade, as colunas da matriz de comparações paritárias são múltiplos escalares entre si, de forma que as colunas normalizadas (i.e onde cada célula é dividida pela soma da coluna) são idênticas, e qualquer uma delas pode representar os valores relativos das alternativas. Isto ocorre quando se tem uma transitividade cardinal perfeita, i.e. as comparações realizadas foram perfeitamente consistentes (Silva 2003). Porém, segundo Morita (1998), isto não acontece normalmente na prática, e é necessário utilizar o método do autovalor para analisar a consistência das comparações.

### 5.5 Prioridades relativas.

O AHP utiliza o método de autovalor (“eigenvalue”) para determinar os pesos dos elementos da matriz pareada, a ordem de prioridade, e como uma medida da consistência do julgamento.

Os elementos da matriz de comparações paritárias com colunas normalizadas denominam-se pesos. Em caso de consistência perfeita, essa matriz é composta de linhas de elementos iguais, enquanto a soma dos elementos de cada coluna é igual à unidade, podendo ser representada por um vetor  $W$  de  $n$  elementos, que são os pesos  $w_i$ ,  $i=1,\dots,n$ . Os pesos são portanto calculados pela equação (3):

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (3)$$

Os elementos da matriz de comparações paritárias se relacionam com os pesos pela equação (4):

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

A equação (4) é equivalente à equação (5):

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1 \quad i, j = 1, \dots, n \quad (5)$$

Conseqüentemente, chega-se à equação (6):

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \frac{1}{w_i} = n \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

O que equivale à equação (7):

$$AW = nW \quad (7)$$

Pela teoria das matrizes, o vetor  $W$  que satisfaz a equação (7) é um autovetor com autovalor  $n$ .

Em casos práticos, onde a reciprocidade da matriz de comparações paritárias não é perfeita, os elementos  $a_{ij}$  se afastam da razão ideal  $w_i/w_j$ , e a equação (7) não é válida.

Porém, combinando-se as duas propriedades seguintes da teoria das matrizes, conclui-se que se a diagonal da matriz  $A$  consiste de elementos unitários ( $a_{ii}=1$ ) e se  $A$  for consistente, então pequenas variações de  $a_{ij}$  mantêm o máximo autovalor  $\lambda_{\max}$  perto de  $n$ , e os demais autovalores próximos de zero:

- Se  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  são números satisfazendo a equação  $Ax = \lambda x$ , ou seja, são autovalores de  $A$ , e se  $a_{ij} = 1$  para todos  $i$ , então vale a equação (8):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n \quad (8)$$

- Se os elementos  $a_{ij}$  de um matriz recíproca foram modificados em pequenas quantidades, os autovalores se alteram em pequenas quantidades.

Assim, para encontrar o vetor prioridade, deve-se encontrar o vetor  $W$  que satisfaça a equação (9):

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (9)$$

A distância entre  $\lambda_{\max}$  e  $n$  é, portanto, uma medida de consistência.

A partir desses conceitos, Saaty (1980) recomenda o procedimento a seguir para a verificação da consistência dos julgamentos e consolidação das prioridades.

Inicialmente, é feito o cálculo do autovetor de maneira aproximada através de três etapas:

- Somar o total de cada coluna da matriz de comparações.
- Normalizar a matriz, dividindo cada elemento pelo total da sua respectiva coluna, gerando a matriz  $A_w$ , apresentada na equação (10).
- Calcular a média aritmética de cada linha da matriz normalizada, gerando o vetor  $C$ , apresentado na equação (11).

$$A_w = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^m a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^m a_{i2}} & \dots & \dots & \frac{a_{1m}}{\sum_{i=1}^m a_{im}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{m1}}{\sum_{i=1}^m a_{i1}} & \frac{a_{m2}}{\sum_{i=1}^m a_{i2}} & \dots & \dots & \frac{a_{mm}}{\sum_{i=1}^m a_{im}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^m a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^m a_{i2}} + \dots + \frac{a_{1m}}{\sum_{i=1}^m a_{im}} \\ m \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{a_{m1}}{\sum_{i=1}^m a_{i1}} + \frac{a_{m2}}{\sum_{i=1}^m a_{i2}} + \dots + \frac{a_{mm}}{\sum_{i=1}^m a_{im}} \\ m \end{bmatrix} \quad (11)$$

O vetor  $C$  é o autovetor dos critérios/indicadores de decisão de cada nível. O mesmo processo deve ser aplicado para cada matriz de comparações abarcando toda a estrutura hierárquica do problema. Os elementos  $c_i$  representam o grau relativo de importância do  $i$ -ésimo elemento no vetor coluna de pesos de importância.

Em seguida, multiplica-se a matriz de comparações ( $A$ ) paritárias pelo autovetor da solução estimada (vetor  $C$ ), resultando um vetor coluna chamado por Morita (1998) de vetor das prioridades consolidadas, como apresentado na equação (12)

$$A \cdot C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ xm \end{bmatrix} \quad (12)$$

Quando as colunas normalizadas não são idênticas aparece a inconsistência da matriz de comparações paritárias, requerendo uma avaliação da consistência. A consistência de uma matriz positiva recíproca requer que seu autovalor máximo,  $\lambda_{\max}$ , seja igual ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias  $n$ . Quanto mais próximo  $\lambda_{\max}$  for de  $n$  mais consistente será o resultado.  $\lambda_{\max}$  é calculado por meio da equação (13).

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i\text{-ésima entrada em } A \times C}{i\text{-ésima entrada em } C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i} \quad (13)$$

O índice de consistência IC de uma matriz de comparações paritárias é usado para mostrar quanto o valor de  $\lambda_{\max}$  está afastado do valor teórico esperado  $n$ , portanto o desvio é dado por  $(\lambda_{\max} - n)$ . Esta diferença é medida relativamente ao número de graus de liberdade desta matriz  $(n-1)$ . Assim, o índice de consistência é dado pela equação (14)

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

Se IC é suficientemente pequeno, as comparações do decisor são provavelmente consistentes para dar estimações úteis dos pesos da função objetivo. O índice de consistência é comparado com o índice randômico (IR) para o valor  $n$  (número de ordem da matriz de comparações paritárias) para determinar se o grau de consistência é satisfatório. O índice randômico representa o valor que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem  $n$  em que não fossem feitos julgamentos lógicos, preenchendo-se os elementos com valores aleatórios. Os valores do índice randômico para diferentes matrizes do tipo matriz de comparações paritárias foram calculadas por Saaty (1980) e estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15. Índice randômico em função da ordem da matriz de comparações paritárias (Saaty 1980).**

Ordem	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.58

A razão de consistência permite analisar o grau de violação da proporcionalidade e transitividade dos julgamentos do decisor. A razão de consistência é calculada pela equação (15):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (15)$$

Adota-se que se  $IC/IR < 0,10$  o grau de consistência é satisfatório, mas se  $IC/IR > 0,10$  podem existir sérias inconsistências e o AHP não pode dar resultados significativos. Quando o grau de consistência é pobre (um índice de consistência maior do que 0,10), é necessário obter mais informações nas comparações dos critérios, ou seja, realizar uma coleta de informações a partir de uma nova avaliação de julgamentos (Marques 2002). Marques (2002) propõe que  $\lambda_{\max} < n+5\%$ , pois assim o índice de consistência (IC) sempre terá um valor próximo de 0 e a razão de consistência (RC) sempre será menor do que 0,10.

Saaty (1999) dispensa a Tabela 15 por um critério de  $IC_{\text{máximo}}$ , onde se a matriz é de ordem 3 o  $IC_{\text{máximo}}$  deve ficar perto de 5%, se a matriz é de ordem 4 o  $IC_{\text{máximo}}$  deve ficar perto de 8% e para matrizes de maior ordem ( $>5$ ) o  $IC_{\text{máximo}}$  deve ficar perto de 10%. Com os dois critérios (RC e  $IC_{\text{máximo}}$ ), garante-se um nível tolerável de consistência dentro da estrutura hierárquica.

### **5.6 Cálculo dos pesos finais.**

Segundo Morita (1998), para reduzir o efeito de reversão (ou reversão de ordem, i.e a troca da ordem das alternativas de decisão que pode levar a decisões radicalmente diferentes, que ocorre quando se retiram ou se incluem matrizes de comparações paritárias de critérios; ou pela variação na quantidade de alternativas) nos pesos finais, existem três modos de cálculo: o modo distributivo, o modo ideal e o modo absoluto.

O modo distributivo, onde os pesos totalizam o valor unitário, é a forma original de cálculo do AHP. É recomendado para priorizar alternativas de planejamento, para avaliar sob critérios que não se repetem e para alocação de recursos escassos. Morita (1998) compara esse modo com fatias de mercado: uma entrada de participantes com pequenas fatias provoca a redução da fatia do líder e também das distâncias entre os concorrentes; conforme as forças intervenientes no processo, o líder pode perder sua posição.

No modo ideal é atribuído o valor unitário para o peso da alternativa de maior prioridade, normalizando-se a seguir o vetor dos pesos resultantes. Este modo é recomendado quando se busca uma única e melhor alternativa de um conjunto, ou quando existem alternativas muito semelhantes, que não serão excluídas, mas apenas priorizadas. Morita (1998) exemplifica esse modo pela altura das pessoas: a quantidade de “baixinhos” não altera a posição do indivíduo mais alto. No modo ideal existe uma contenda individual, dando-se mais ênfase à seqüência que às medidas de classificação.

No modo absoluto é recomendado quando o número de alternativas é alto, acima de 9 (por exemplo, com 10 alternativas são necessárias  $[n(n-1)/2]=45$  julgamentos). Permite que o modo de trabalho seja menos cansativo e mais direto quando o número de alternativas é grande.

### 5.7 Variante multiplicativa do método de análise hierárquica.

Infelizmente algumas normalizações e o uso de funções aditivas podem levar a resultados errôneos, como apresentado por Triantaphyllou (2001). Pode-se evitar o efeito do tipo de normalização (ideal ou distributiva) usando a versão multiplicativa do AHP.

O modelo usado é o chamado de produto de pesos (WPM – Weighted Product Model), onde duas alternativas são comparadas ao mesmo tempo segundo a equação (16).

$$R\left(\frac{A_K}{A_L}\right) = \prod_{j=1}^n \left(\frac{a_{Kj}}{a_{Lj}}\right)^{w_j} \quad (16)$$

Se a proporção acima é maior ou igual que um, então a conclusão é que  $A_K$  é melhor ou igual que  $A_L$ ; obviamente, o peso da melhor alternativa é maior que os de todas as outras alternativas.

Sejam quaisquer três alternativas,  $A_1$   $A_2$   $A_3$  com  $n$  critérios de decisão. Suponha-se que a alternativa  $A_1$  é preferível à alternativa  $A_2$ , i.e.:  $A_1 > A_2$ , então de acordo com a equação (17) a seguinte relação deve ser verdade:

$$R\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{a_{1i}}{a_{2i}}\right)^{w_i} > \mathbf{1} \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow \prod_{i=1}^n (a_{1i})^{w_i} > \prod_{i=1}^n (a_{2i})^{w_i}$$

A equação (17) pode ser aplicada às outras alternativas, ( $A_2 > A_3$  e  $A_1 > A_3$ ).

Esta variante deve ser aplicada na última etapa do AHP, quando a matriz de decisão se processa e os pesos das alternativas são determinados. Sua vantagem, segundo Triantaphyllou (2001) e uma aproximação em Moreno e Escobar (2000), é que existe uma independência em

relação ao modelo de normalização (ideal ou distributivo), o que faz da variante multiplicativa uma ferramenta muito útil.

### **5.8 Por que o método de análise hierárquica?**

O método de análise hierárquica foi escolhido para esta pesquisa devido às seguintes características (Marques 2002, Lisboa 2002, Morita 1998, Baasch 1995):

- Permitir uma visão global das relações inerentes ao processo.
- Permitir comparações em vários níveis e ser flexível quanto à entrada e retirada de dados.
- Integrar dados e ser eficaz na combinação dos vários atributos obtidos.
- Permitir estruturação hierárquica do problema e poder avaliar um grande número de fatores quantitativos e qualitativos, de maneira sistemática, sob critérios múltiplos e conflitantes.
- Ser matematicamente simples, o que facilita a multidisciplinaridade.
- Proporcionar uma estrutura flexível, aproximando da realidade as tomadas de decisão em vários âmbitos.
- A abordagem da solução é do tipo “dividir para conquistar”.
- O resultado final permite definir uma seqüência cardinal da importância dos critérios e das alternativas.
- Não obriga que os fatores sejam necessariamente representados em termos de valores econômico-financeiros, técnicos ou físicos.
- Intervenção contínua e direta do decisor ou de outros atores na construção da solução e não somente na definição do problema.

## 6 METODOLOGIA.

Para a utilização do método de análise hierárquica como apoio à tomada de decisões na localização de barragens de contenção de rejeitos de mineração, utilizou-se a metodologia proposta por Lisboa (2002) e explicada a seguir.

Inicialmente procurou-se definir o maior número de atributos relevantes para esta aplicação, formulando-se uma tabela geral de atributos para escolha de locais para barragens de rejeitos.

Definiu-se um estudo de caso, que é a seleção de local para a nova barragem de rejeitos de minério cobre da MINER S.A no município de Carmen de Atrato, na Colômbia.

Antes da aplicação do AHP, utilizou-se um avaliador geológico de prospecção do tipo geoquímico para isolar zonas onde há indícios fortes de existência importante de minério, ou seja, zonas de mineralização. Essas zonas serão possivelmente futuras zonas de exploração de minério e devem ser evitadas como locais de barragens de rejeitos.

Depois de isolar os locais que não apresentam quantidades importantes de minério, foram levantados dados das áreas que podem servir para a construção de barragens de rejeitos, que são as alternativas a serem analisadas pelo AHP.

Desenvolveu-se inicialmente um conjunto de critérios e indicadores, sua hierarquização e unidades de medida, com base em Lisboa (2002). A seguir esses critérios e indicadores foram redefinidos considerando o envolvimento de especialistas, e finalmente foi feita uma nova redefinição deste conjunto de critérios e indicadores considerando a disponibilidade de dados no estudo de caso. Essas informações foram utilizadas para a avaliação das alternativas de local frente aos critérios e sub-critérios da hierarquia.

A elaboração da hierarquia foi feita com base no objetivo geral de menor impacto ambiental. Procurou-se definir e detalhar os principais tipos de impacto que uma barragem de rejeitos geraria na região, gerando os níveis mais baixos da hierarquia, sempre com o objetivo de minimizar o impacto ambiental correspondente. No último nível foram colocadas as

alternativas de local, e todas as informações coletadas em campo com base na tabela geral de atributos foram utilizadas para avaliar as preferências entre as alternativas.

A análise de custos foi feita separadamente para cada alternativa, e no final se confrontam custos com pesos resultantes da análise hierárquica.

### **6.1 Definição de atributos relevantes.**

Os atributos relevantes foram definidos da seguinte forma:

- revisão bibliográfica sobre os fatores que influenciam a escolha de locais de implantação de barragens de rejeitos (itens 4.1 a 4.5 do Capítulo 4)
- formulação de uma tabela resumo a partir dos dados obtidos na revisão bibliográfica (item 4.6 do Capítulo 4, Tabela 13)

### **6.2 Estudo de caso.**

Utilizou-se a região do município de Carmen de Atrato, na Colômbia, onde já está implantada uma mineradora de minério de cobre, supondo a escolha de um local para uma nova barragem de rejeitos. O estudo de caso está apresentado mais detalhadamente no Capítulo 7.

### **6.3 Avaliador geológico de prospecção.**

Na localização de uma área para a construção de uma barragem de rejeitos, o primeiro que pensa o minerador é que a barragem não fique num local que possa ter concentrações de minério importantes.

Com ajuda da geoquímica se estabelecem as condições de contorno do problema em nível local. A análise geoquímica é um método indireto e baseia-se na medição sistemática de uma ou várias propriedades químicas do material natural, para determinar o teor de um elemento ou de um grupo de elementos. O material natural inclui rochas, solos, capas de hidróxidos de ferro, sedimentos glaciais, vegetação, sedimentos de rios e lagos, água e vapor.

A geoquímica está enfocada no descobrimento de distribuições anômalas de elementos. No estudo de caso, são reportadas anomalias em sedimentos de drenagem, particularmente nas correntes de riachos, e que são chamadas na geoquímica de sedimentos ativos; são eles os

materiais utilizados para um reconhecimento geral da região no caso de prospecção para minérios de cobre. Os sedimentos ativos de correntes de água incluem materiais clásticos de drenagens naturais, nascentes, leitos dos riachos e outros.

Definem-se como elementos exploradores os seguintes elementos: Ouro (Au), Prata (Ag), Zinco (Zn), e Chumbo (Pb), que são os indicadores para o tipo de depósito da área.

Retiram-se amostras de sedimentos ativos da região em estudo e determinam-se concentrações dos elementos exploradores por meio de análise química.

O avaliador geológico de prospecção foi utilizado pela Mineradora MINERA S.A. na região do estudo de caso e os resultados estão apresentados no item 7.3 do Capítulo 7 e no Anexo 2

#### **6.4 Definição de indicadores.**

Os indicadores apresentados na Tabela 16 são o resultado da reavaliação da Tabela 13, selecionados como os mais significativos para efeito de análise.

A seguir, segundo as recomendações de Lisboa (2002), foram feitas reuniões com especialistas (“brainstorming”) para redefinir quais indicadores seriam os mais adequados para este tipo de estudo. Nesta dissertação colaboraram cinco profissionais especialistas que atuam em obras mineradoras. Idealmente todos os especialistas devem estar juntos nas reuniões de “brainstorming”, mas isto não foi possível: foi feita uma reunião com três especialistas e entrevistas individuais com os outros dois.

Houve ainda uma revisão final dos dados a partir da experiência profissional, resultando na formulação de uma tabela de indicadores para a escolha de locais para barragens de rejeitos, apresentada na Tabela 17. Observa-se que, como resultado do “brainstorming” e da revisão final, reduziu-se a quantidade de indicadores.

O conjunto de indicadores da Tabela 17 pode ser considerado como um conjunto de fatores básicos de análise, configurando uma avaliação de áreas para barragens de rejeitos tanto em nível regional como local. Foram, então, coletadas as informações relativas a cada indicador, para utilização posterior na análise hierárquica.

**Tabela 16 Indicadores sugeridos.**

		INDICADORES		UNIDADES	
ASPETOS ECONOMICOS	Custos iniciais			R\$	
ASPETOS TOPOGRAFICOS	Relevo	Formas	Encosta Plana	% inclinação	
			Encosta íngreme	% inclinação	
			Zonas marginais de inundação	Nenhuma – moderada – excessiva	
		Declividade	Baixa (5-10%)	%	
			Media (10-25%)	%	
			Alta (> 25%)	%	
	Distancia do limite entre bacias hidrográficas	> 200 m.	m.		
		200 – 100 m.	m.		
		< 100 m.	m.		
	Tipo de Arranjo e Disposição	Montante (em vale – bacia – meia encosta)		Sim - não	
Jusante (em vale – bacia – meia encosta)		Sim - não			
Linha de centro (em vale – bacia – meia encosta)		Sim – não			
Opções especiais (Cavas, submarina, subterrânea, em pit)		Sim – não			
ASPETOS GEOLOGICOS GEOTECNICOS	Substrato Rochoso – Fundações	Resistência	Rocha fraca	5,0 – 25 MPa.	
			Rocha mediantemente resistente a resistente	25 – 100 MPa.	
			Rocha muito resistente	100 – 250 MPa.	
		Descontinuidades	Blocos muito grandes – grandes	JV (<1 – 3)	
			Blocos médios – pequenos	JV (3-30)	
			Blocos muito pequenos	JV > 30	
		Litologia	Metamórfica	Tipo de rocha	
			Sedimentaria	Tipo de rocha	
		Profundidade	Ígnea	Tipo de rocha	
			< 5 m	m.	
		Mergulho	5 – 20 m	m.	
			> 20 m.	m.	
		Materiais inconsolidados	Textura	<10°	Grados
				10° - 60°	Grados
	> 60°			Grados	
	Matacões			Pedregulho	Classificação Sistema unificado
				Areia	Classificação Sistema unificado
			Silte	Classificação Sistema unificado	
			Argila	Classificação Sistema unificado	
			Solo orgânico	Classificação Sistema unificado	
	Variação vertical.		Maior dimensão	m.	
			Frequência	Und/1000 m <sup>3</sup>	
			profundidade	m.	
			Homogêneo.	Continuo - descontinuo	
			Heterogêneo.	Continuo - descontinuo	
	Permeabilidade		Características de compactação	Proctor normal	Adequada – inadequada
			> 10 <sup>-2</sup>	cm./s	
			10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-7</sup>	cm./s	
	Tipo de deposito	< 10 <sup>-7</sup>	cm./s		
		Residual	Ocorre – não ocorre		
		Coluvião	Ocorre – não ocorre		
		Aluvião	Ocorre – não ocorre		
	Estruturas geológicas	Glacial	Ocorre – não ocorre		
		Falhas	Direção		
	Processos	Zonas de minério	Possíveis – não possíveis		
		Movimentos de massa gravitacionais	Frequência	Ocorre – não ocorre	
			Intensidade	No / Km <sup>2</sup>	
		Subsidências	Frequência	Ocorre – não ocorre	
	Intensidade		No / Km <sup>2</sup>		

		Feições cársticas	Frequência	Ocorre – não ocorre
			Intensidade	No / Km <sup>2</sup>
		Erosão	Frequência	Ocorre – não ocorre
			Intensidade	No / Km <sup>2</sup>
ASPETOS HIDRICOS	Águas subterrâneas	Profundidade da zona saturada	> 6 m	m.
			< 4 m	m.
			< 2 m	m.
		Fluxo saturado	Direção	No de direções
			Vazão	m./s
		Risco de poluição	Alto	25
	Médio		12,5	
	Baixo		0,2	
	Áreas de captação	Distancia da nascente	>500 m.	m.
			500 – 300 m	m.
< 300 m			m.	
Condições de drenagem		Bem drenada - Mal drenada		
Fluxo superficial	Correntes de água	Laminar - concentrado		
	Escoamento superficial	Laminar – concentrado		
ASPETOS CLIMATICOS	Taxa anual de precipitação	< 1500 mm/ano	mm./ano	
		> 2000 mm/ano	mm./ano	
	Evotranspiração	>1000 mm	mm.	
		1000 – 600 mm	mm.	
		< 600 mm	mm.	
	Vento	Direção	A zona urbana	
Velocidade		m./s		
ASPETOS OPERACIONAIS	Local	Capacidade de armazenamento	área	m. <sup>2</sup>
			Volume	m. <sup>3</sup>
		Acessos	Favorável	% extensão
			Com algumas restrições	% extensão
			Restrito	% extensão
		Distancia do local da mina	< 1km	Km
	1 km – 10 km		Km	
	> 10 Km		Km	
	Necessidade de bombeamento	< 50 m cabeça estática	m.	
		50- 100 m.	m.	
		>100 m	m.	
	Rejeitos	Velocidade de deposição	Alta	cm./sg
Baixa			cm./sg	
Características físicas – químicas		densidade	Ton/ m. <sup>3</sup>	
		pH (acido – alcalino)	PH	
		% sólidos por peso	%	
		Temperatura	°C.	
USOS DO SOLO	Impactos no uso do solo.	Unidades produtivas e de uso intensivo	m. <sup>2</sup>	
		Unidades habitacionais	Número de residências	
		Unidades de vegetação nativa	m. <sup>2</sup>	
		Unidades de reflorestamento, pastagem e agricultura	m. <sup>2</sup>	
		Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensitivos ou arqueológicos.	m. <sup>2</sup>	
		Unidades minérias na área	m. <sup>2</sup>	
	Impactos no meio físico	Interferências com recursos hídricos	Numero de cursos d'agua	
		Impactos na qualidade do ar	% de extensão	
ASPETOS SOCIO – ECONOMICOS	Demografia		Habitantes / km <sup>2</sup>	
	População economicamente ativa		%	
	Serviços Públicos	Aqueduto	% cobertura de serviço	
		Saneamento	% cobertura de serviço	
		Energia	% cobertura de serviço	
	Atividades produtivas	Setor agrícola	% população	
		Setor ganadeiro	% população	
Setor mineiro		% população		

Tabela 17 Indicadores depois das reuniões “Brainstormig”.

		INDICADORES			UNIDADES	
NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4		RS	
ASPETOS ECONOMICOS	Custos iniciais					
RELEVO	Formas		Encosta Plana		% inclinação	
			Encosta íngreme		% inclinação	
			Zonas marginais de inundação		Nenhuma – moderada – excessiva	
	Declividade		Baixa (5-10%)		%	
			Media (10-25%)		%	
			Alta (> 25%)		%	
ASPETOS GEOLOGICOS GEOTECNICOS	Substrato Rochoso – Fundações	Resistência		Rocha fraca	5,0 – 25 MPa.	
				Rocha mediamente resistente a resistente	25 – 100 MPa.	
				Rocha muito resistente	100 – 250 MPa.	
		Litologia		Metamórfica		Tipo de rocha
				Sedimentaria		Tipo de rocha
				Ígnea		Tipo de rocha
		Profundidade		< 5 m		m.
				5 – 20 m		m.
				> 20 m.		m.
		Mergulho		<10°		Grados
				10° - 60°		Grados
				> 60°		Grados
	Materiais inconsolidados	Textura		Pedregulho		Classificação Sistema unificado
				Areia		Classificação Sistema unificado
				Silte		Classificação Sistema unificado
				Argila		Classificação Sistema unificado
				Solo orgânico		Classificação Sistema unificado
		Matacões		Maior dimensão		m.
				Frequência profundidade		Und/1000 m <sup>3</sup>
						m.
		Variação vertical.		Homogêneo.		Continuo - descontinuo
				Heterogêneo.		Continuo - descontinuo
		Permeabilidade		> 10 <sup>-2</sup>		cm./s
				10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-7</sup>		cm./s
				< 10 <sup>-7</sup>		cm./s
		Tipo de deposito		Residual		Ocorre – não ocorre
				Coluvião		Ocorre – não ocorre
				Aluvião		Ocorre – não ocorre
				Glacial		Ocorre – não ocorre
		Processos	Movimentos de massa gravitacionais		Frequência	
				Intensidade		No / Km <sup>2</sup>
	Subsídências			Frequência		Ocorre – não ocorre
			Intensidade		No / Km <sup>2</sup>	
Feições cársticas			Frequência		Ocorre – não ocorre	
			Intensidade		No / Km <sup>2</sup>	
Erosão		Frequência		Ocorre – não ocorre		
		Intensidade		No / Km <sup>2</sup>		
Estruturas geológicas	Falhas		Direção		Interfere – não interfere	
	Zonas de Minério		Concentração		Ocorre – não ocorre	
AGUAS SUBTERRANEAS	Profundidade da zona saturada		> 6 m		m.	
			< 4 m		m.	
			< 2 m		m.	
	Risco de poluição		Alto		25	
		Médio		12,5		
		Baixo		0,2		
USOS DO SOLO	Impactos no uso do solo.		Unidades produtivas e de uso intensivo		m. <sup>2</sup>	
			Unidades habitacionais		Número de residências	
			Unidades de vegetação nativa		m. <sup>2</sup>	
			Unidades de reflorestamento, pastagem e agricultura.		m. <sup>2</sup>	
		Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensíveis ou arqueológicos.		m. <sup>2</sup>		
	Impactos no meio físico		Interferências com recursos hídricos		n.º cursos de água/km	
		Impactos na qualidade do ar		% extensão.		

## **7 ESTUDO DE CASO.**

Para o estudo de caso utilizou-se a região do município de Carmen de Atrato, na Colômbia, onde já está implantada uma mineradora de minério de cobre, supondo a escolha de um local para uma nova barragem de rejeitos.

É importante esclarecer que na Colômbia a construção de barragens para a deposição de rejeitos de mineração é uma proposta nova, pois até recentemente estes eram descartados sem controle sobre terreno natural ou cursos d'água. Só há registro de barragens de rejeitos em duas regiões do país, sendo uma delas a região escolhida para o estudo de caso.

### **7.1 Localização e estradas de acesso.**

A área de estudo localiza-se no Estado de Chocó no município de Carmen de Atrato ao noroeste da Colômbia, na margem esquerda da cordilheira ocidental. Dista de 546 Km da capital da Colômbia, Bogotá, e de 146 Km da cidade de Medellín, capital do Estado de Antioquia. As coordenadas geodésicas são: longitude 76° 9' W e latitude 5° 56' N.

O acesso à área de estudo se faz pela estrada Medellín – Município de Caldas – Município de Bolombolo – Município de Ciudad Bolívar – Município de Carmen de Atrato em quatro horas por rodovia pavimentada. Na Figura 21 e Figura 22 estão apresentando os mapas de localização do município de Carmen de Atrato e da área de estudo, respectivamente.

### **7.2 Caracterização do meio físico – biótico.**

São descritos alguns aspectos da área de estudo relevantes para esta pesquisa. Também são definidos os fatores comuns aos locais identificados como possíveis para a construção da barragem, ou seja, os fatores que não serão considerados por não diferenciarem as alternativas.

#### **7.2.1 Mina.**

A 3 Km do município de Carmen de Atrato fica a Mineradora MINER S.A, empresa que extrai minério de calcopirita, ouro e prata de um depósito de sulfetos tipo Chipre.

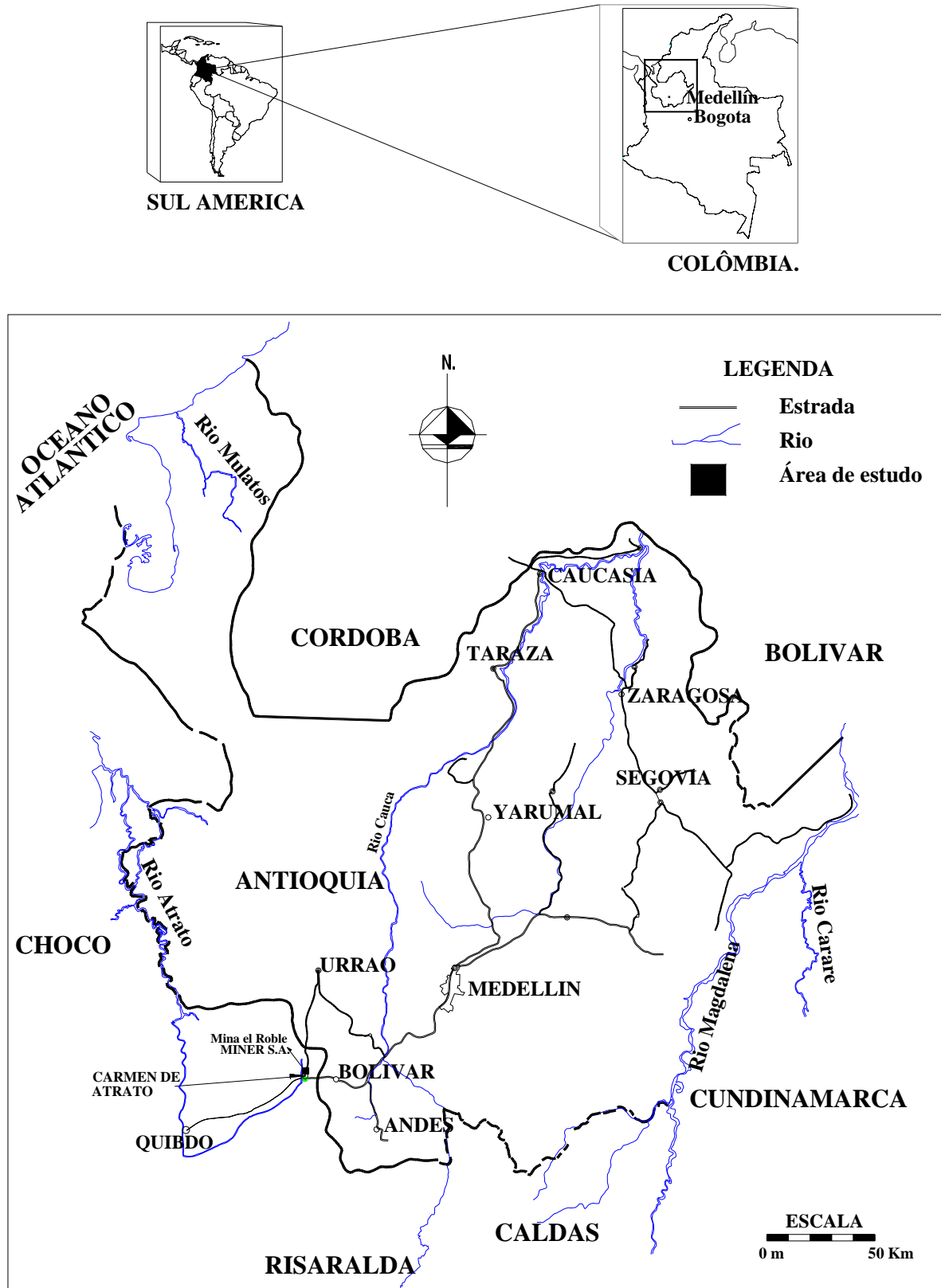


Figura 21. Localização geográfica do Município de Carmen de Atrato.

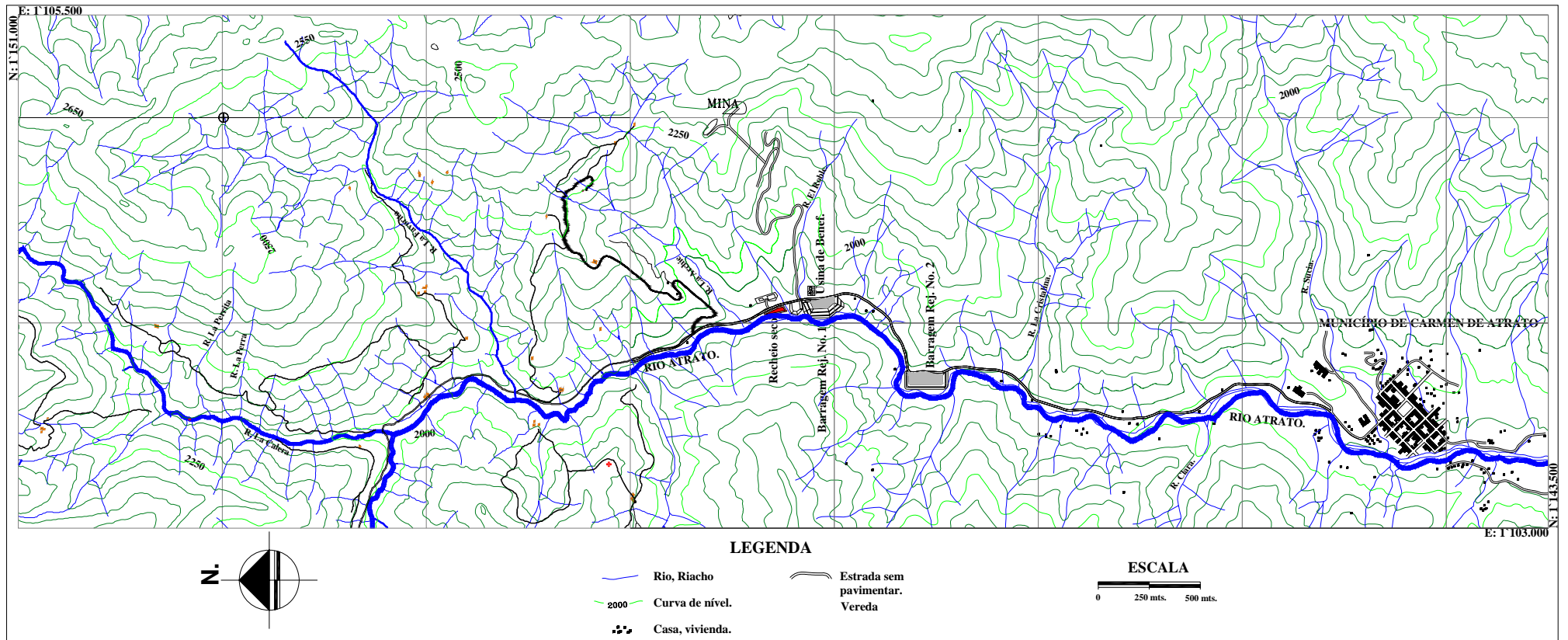


Figura 22. Localização da área de estudo.

Esses minérios são extraídos da interface de uma seqüência de rochas sedimentares marinhas com rochas vulcânicas de idade Cretácea. A extração se faz de forma subterrânea, pelo método de “cut and fill” (corte e aterro) ou pelo método de “sublevel stoping” (câmaras por subníveis). Na Figura 23 se apresenta uma seção típica do depósito de minério, e dois túneis de produção. Atualmente os trabalhos de extração e produção estão entre os níveis 2100 a 200 msnm (metros sobre o nível do mar).

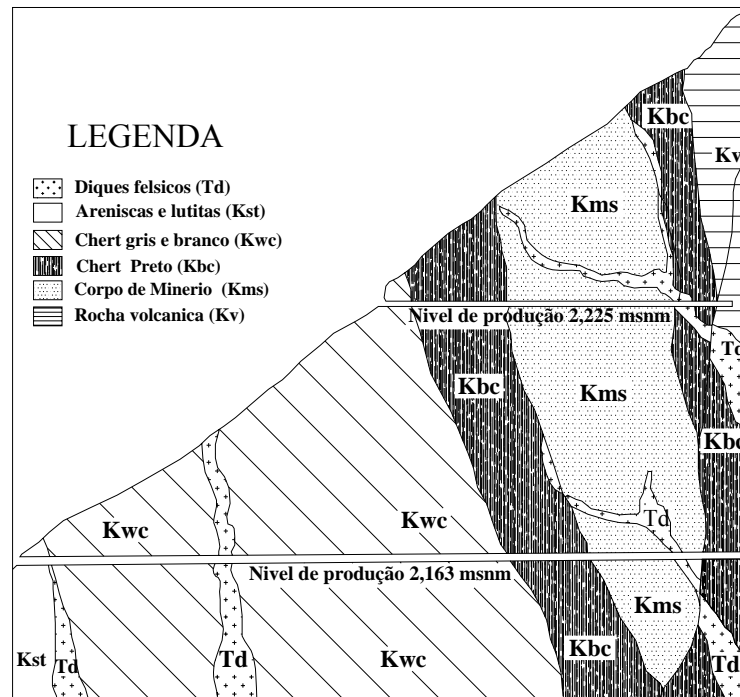


Figura 23. Seção típica do depósito de minério.

### 7.2.1.1 Usina de beneficiamento e barragens de rejeitos.

O minério extraído é beneficiado numa usina com capacidade para processar 400 ton/dia. O minério sai da mina com dimensão de aproximadamente 300 mm e na usina é britado e moído até ser reduzido a um tamanho de 0,057 mm, com a finalidade de separar os minerais de calcopirita (minério de cobre), ouro e prata, dos materiais inservíveis. A separação é feita por flotação diferencial, onde se geram concentrados de calcopirita e rejeitos.

A densidade específica dos rejeitos secos é 2.0; diariamente são depositados 270 ton de rejeitos. Os rejeitos saem da usina de beneficiamento com 30% de sólidos por peso e são armazenados em barragens; no momento, há duas barragens feitas pelo método de montante, uma (a barragem No 2) fora de operação. A quantidade de rejeitos que gera a mina é de 70.000 ton/ano, e as capacidades de armazenagem da barragem No 1 é de 100.000 ton. Conta-

se com um mecanismo de deposição de rejeitos chamado de “recheio seco”, onde os rejeitos são decantados na barragem No 1, tirando-se a máxima quantidade possível de água. Assim os rejeitos ficam mais secos e podem-se transportar facilmente por caminhões a um local perto da usina de beneficiamento. Este local tem uma capacidade de armazenamento de 210.000 ton de rejeitos, isto é, para 3 anos de operação, e a seleção de um novo local para a construção duma barragem é uma prioridade.

A mineradora escolhia os locais só tendo em conta os aspetos económicos, mas com as novas legislações ambientais, é preciso vincular todos os aspetos requeridos por uma obra destas características.

### 7.2.1.2 Produção de resíduos e contaminantes.

Os resíduos que gera a mina são de dois tipos: sólidos e líquidos.

Os resíduos sólidos são chamados estéreis quando são produzidos pelas atividades de extração de minério, e rejeitos quando são produzidos pela usina de beneficiamento. A produção de estéreis alcança 20 ton/mês, que são dispostas em superfície na saída dos túneis de produção (nível 2162, 2100 e 2000).

Os resíduos líquidos são constituídos pelas águas freáticas que saem diretamente dos túneis de extração de minério e pelas águas geradas na usina de beneficiamento e nas barragens de rejeitos. Na Tabela 18 se apresentam algumas características das drenagens da mina e dos efluentes das barragens de rejeitos

**Tabela 18. Características das drenagens da mina e dos efluentes das barragens de rejeitos.**

PARÂMETRO	MINA	BARRAGENS DE REJEITOS	
		AFLUENTE	EFLUENTE
Temperatura °C	16	18	14
pH	7,92	8,96	6,64
Sólidos totais (mg/L)	3525	22220	1490
Sólidos em suspensão (mg/L)	435	21840	45
DBO (mg/L)	12,1	2225	63
DQO (mg/L)	64,5	5978	72,5

### 7.2.2 Geologia local.

Duas grandes unidades litológicas têm sido cartografadas como principais:

- Uma unidade vulcânica (correlacionada com a formação Barroso), de idade Cretácea, caracterizada por ser um complexo de lava composto por diabásio, basalto, lava, tufo, brecha e aglomerados; seus afloramentos encontram-se situados no eixo montanhoso que divide as bacias dos rios Habita e Atrato.
- Uma unidade sedimentar (formação Penderisco) com dois membros, um constituído por rochas sedimentares clásticas (membro Urrao), composto por conglomerados, arenitos e lutitos, e outro formado por rochas de origem biogênica e/ou química (membro Nutibara), composto por “chert” preto, cinza e branco. O membro Nutibara encaixa depósitos de mineralizações importantes. Situa-se do lado da unidade vulcânica e estratigraficamente sob a Formação Barroso. O membro Urrao fica junto, como os dedos das mãos entrelaçadas da formação Nutibara. Na Figura 25 é apresentada a geologia da área, baseada em dados de campo e em informações de fotografias aéreas (Figura 24).

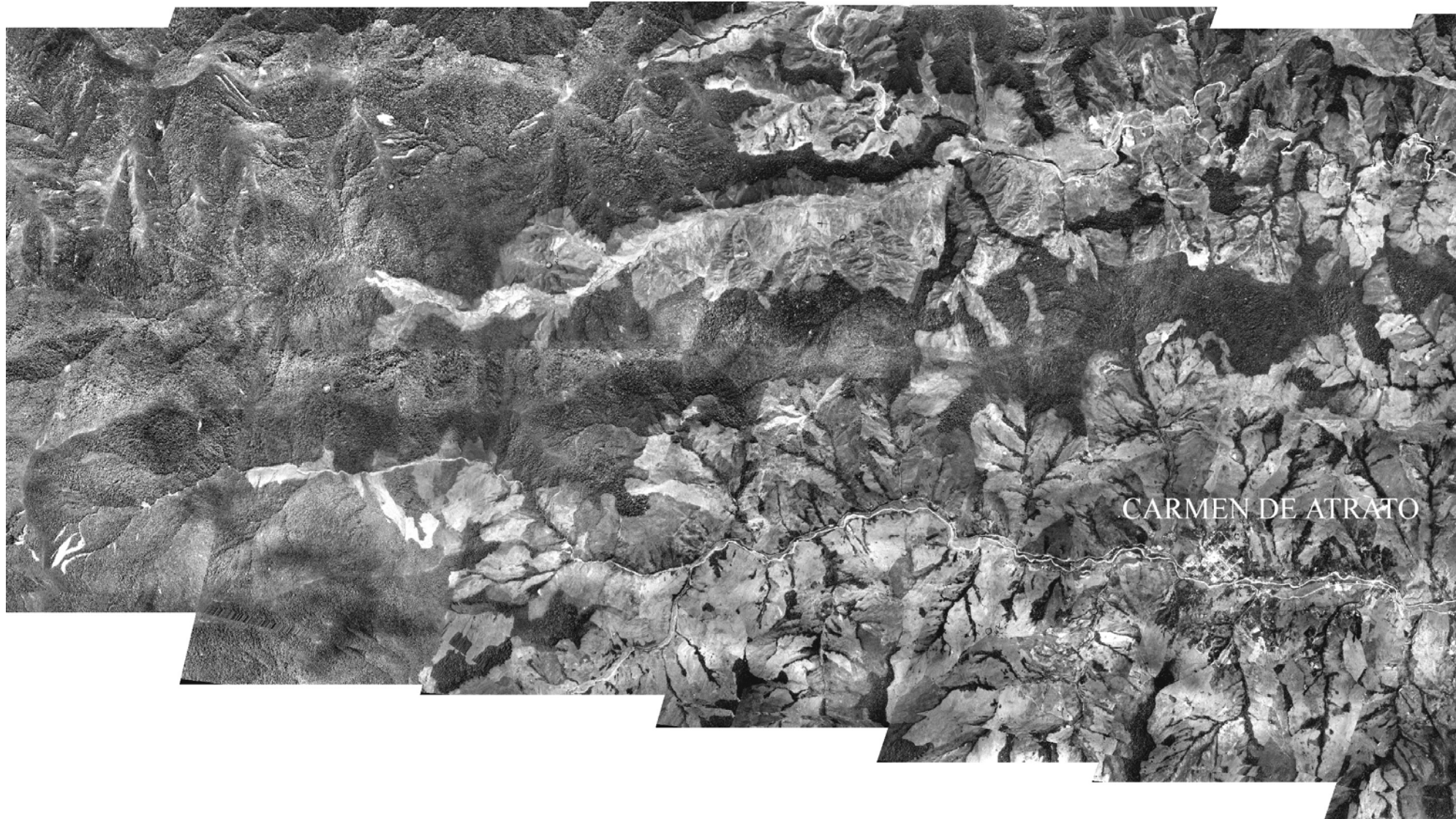
### 7.2.3 Geomorfología.

O relevo em geral é abrupto e muito íngreme, com declividade transversal média de 55°, chegando em alguns pontos até 80°, o que implica condições naturais muito favoráveis para promover fenômenos erosivos intensos.

O potencial erosivo se vê especialmente favorecido pelas condições atuais do uso do solo, a perda de cobertura florestal, a geomorfologia e em especial a declividade do terreno e a alta precipitação pluvial. Predominam fenômenos de movimentos de massa, principalmente nas vertentes que vão às correntes de água; observam-se problemas de rastejo.

A drenagem geral se dá pelo rio Atrato, que forma um estreito vale de seção triangular, com terraços aluviais de altura variável. O fluxo pela zona é turbulento, típico dos rios andinos, com alta capacidade de deslocar sedimentos e de blocos de rocha arredondados.

A área de estudo tem uma forte variação altimétrica, alcançando nos pontos mais altos a cota 2500 acima do mar, e nos mais baixos, 1700 acima do mar.



**Figura 24. Mosaico das fotografias aéreas.**

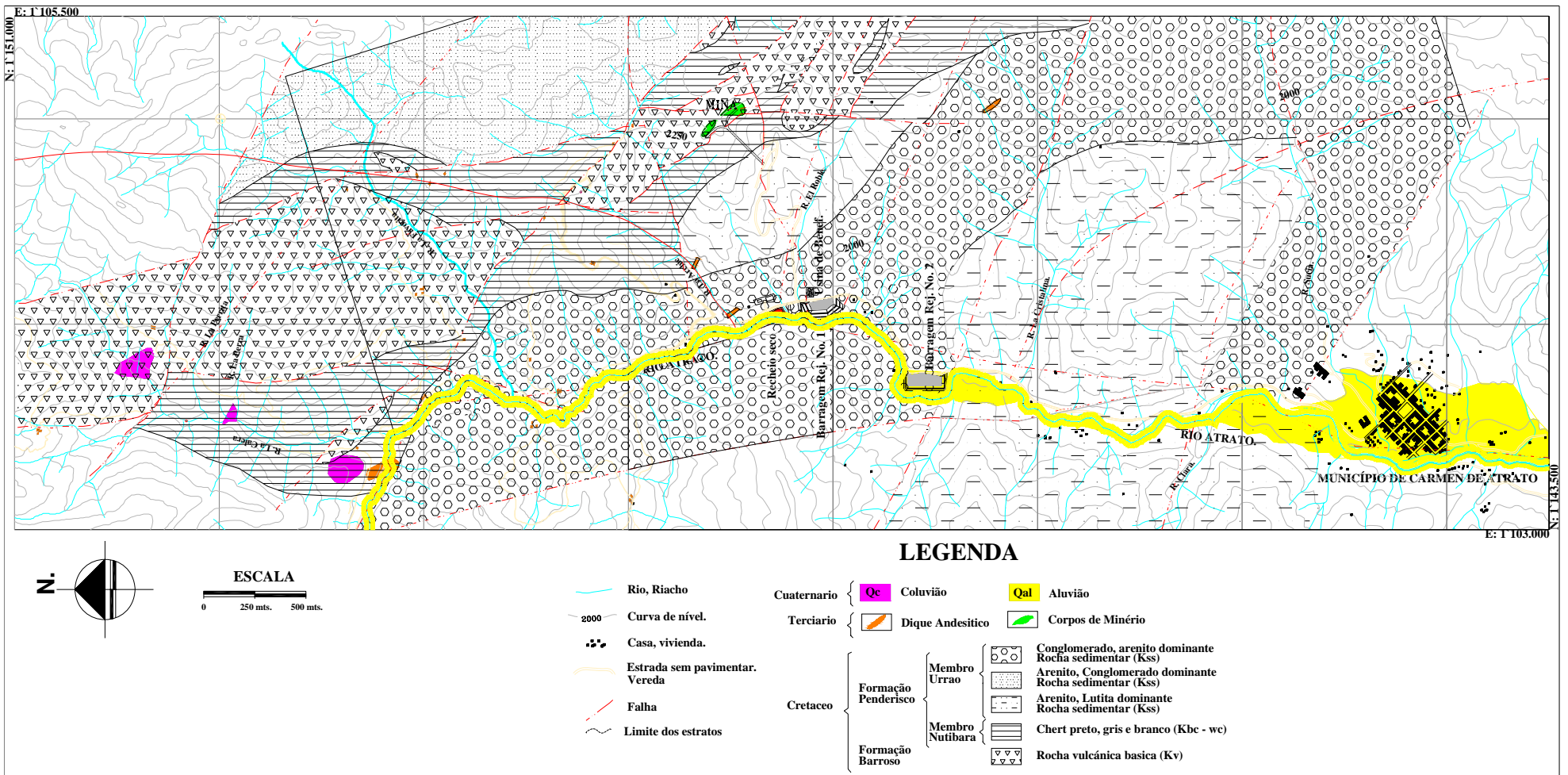


Figura 25. Geologia Local.

#### **7.2.4 Hidrografia e dinâmica fluvial.**

O Rio Atrato na área de influência drena no sentido N-S, por um estreito vale, onde o comprimento máximo é de 3 a 7 metros. O rio fica limitado por acidentes topográficos e geológicos que fazem pequenos estreitamentos do canal aluvial. A profundidade média é de 1 a 1,5 m nos pontos onde se estreita. O regime de fluxo é turbulento. À margem oriental observam-se três níveis de terraços aluviais, de espessura variável entre 1 e 3 metros, onde predominam horizontes argilo-siltosos. O leito do rio é constituído por rochas de grande tamanho e de cantos não arredondados originadas dos afluentes e de solos sedimentares. A erosão é alta, mais nas cabeceiras dos riachos afluentes e principalmente na parte ocidental, onde se apresentam áreas desmatadas. Os afluentes deságuam no rio em forma de cachoeira, formando amplos depósitos de sedimentos transportados desde as cabeceiras e gerados pela erosão superficial de movimentos de massa.

Mesmo que o fluxo seja permanente, a variação de vazão é grande, registrando-se em geral vazões baixas, com mudanças súbitas e vazões instantâneas muito elevadas originadas em tormentas de variada intensidade e agravadas pela falta de cobertura vegetal da bacia.

Os principais cursos de água, localizados na área de estudo são:

Margem direita: Riacho La Clara e 18 riachos sem nome.

Margem esquerda: Riachos: La Calera, La Favorita, La Archie, El Roble, La Cristalina, e outros 22 riachos sem nome.

A área onde se localiza a mina e a usina de beneficiamento é drenada pelo riacho El Roble. Nesta bacia se localizam os principais impactos das atividades da mineradora, principalmente pelos líquidos originados nas drenagens naturais dos túneis de produção.

#### **7.2.5 Hidrologia.**

Na área de estudo o comportamento das vazões é bimodal, com um período de vazões baixas entre os meses de janeiro e fevereiro, e entre os meses de julho e setembro, quando a média é inferior à vazão média multianual, sendo março o mês de vazões mais baixas; os períodos com vazões mais altas são entre abril e julho e entre setembro e dezembro, sendo novembro o

mês dos maiores fluxos. A Tabela 19 apresenta a vazão do rio medida no ponto “Puente Sanchez”, que fica a 2 Km na zona sul do Carmen de Atrato.

**Tabela 19. Comportamento da vazão do Rio Atrato no ponto “Puente Sanchez”.**

MÊS	m <sup>3</sup> /seg
Janeiro	5,9
Fevereiro	4,7
Março	4,5
Abril	10,3
Mai	12,5
Junho	12,4
Julio	9,0
Agosto	8,5
Setembro	8,0
Outubro	12,2
Novembro	12,8
Dezembro	9,6
Média Multianual	9,2

### 7.2.6 Clima.

A área de estudo fica na vertente ocidental da cordilheira ocidental da Colômbia, sob influência das condições meteorológicas dos oceanos Pacífico e Atlântico, que definem fatores como as calmarias equatoriais, regime dos ventos ocidentais (alísios e corrente de Humbolt), a estrutura orográfica, e sua situação em relação à frente intertropical de convergência, e dão lugar a uma área superúmida. A precipitação média anual é de 2.374 mm, uma média mensal multianual de 197,8 mm, e uma média anual de dias de chuva de 188 mm por ano (ver Anexo 1). A precipitação máxima observada foi de 1.131 mm/mês e a mínima de 25 mm/mês. A tendência de umidade é de um período seco entre os meses de janeiro e março seguido dum período úmido entre abril e dezembro, com um verão pequeno em julho e outro em setembro. O mês mais seco é fevereiro e o mais úmido é outubro. A temperatura média é de 17°C, com poucas variações. As condições definidas pelas precipitações dão lugar a um comportamento muito homogêneo, com uma umidade relativa de 90%. A velocidade dos ventos é relativamente baixa e sua direção é geralmente sul, com uma velocidade inferior a 2Km/hr.

### 7.2.7 Flora.

As condições de precipitação, temperatura e altitude em relação ao nível do mar definem, segundo o modelo de Holdridge, uma zona de formação vegetal do tipo bosque muito úmido

baixo de montanha (bmh-MB). Não resta muito do bosque original ou primário, no entanto nos pontos mais altos, acima da cota 2300 msnm, há algumas áreas com bosque secundários em processo de sucessão. A maioria das terras é utilizada para pastoreio e agricultura, dando lugar a fortes processos erosivos, acelerados pela alta umidade e pelas encostas íngremes.

### **7.2.8 Fauna.**

As estruturas atuais do bosque e as áreas virgens determinam a composição da fauna. Não existem estudos detalhados, mas os testemunhos dos camponeses da área reportam alguns mamíferos (morcegos, ratões, felinos menores, veados, tamanduás), répteis, aves e fauna aquática (muito pobre devido fundamentalmente às condições hidráulicas e morfológicas da bacia), mas sem nenhum inventário conhecido da fauna existente.

### **7.2.9 Usos do solo.**

Na área se observam os seguintes usos do solo:

- Agricultura: Atividade primária, cultivos de milho, feijão, cebola, banana da terra, hortaliças. Em geral é uma agricultura de subsistência.
- Pecuária: De tipo extensivo, utilizam-se terras de encostas de alto declive, que favorece os processos erosivos. Os produtos principais são o leite e a carne.
- Reflorestamento: Atividade não muito desenvolvida e de baixa intensidade.
- Mineração: A principal atividade mineradora é feita pela empresa MINER S.A na produção de minérios de calcopirita – ouro – prata.

### **7.2.10 Caracterização do substrato rochoso.**

A caracterização das unidades que formam o substrato rochoso foi realizada com base em fotointerpretação, observações de campo e estudos e mapas pré-existentes (NITTETSU 1991; Ortiz, 1988; Arango, 2003)

#### **7.2.10.1 Rochas vulcânicas cretáceas (kv).**

Esta unidade é a mais antiga da região e representa o embasamento onde estão suportadas as demais unidades litológicas da área. Em geral são rochas diabásicas com textura ofiolítica e

basaltos com textura irregular. Mineralogicamente estas rochas vulcânicas são constituídas por plagioclásio e clinopiroxênios com pequenas quantidades de olivina, ortopiroxênio, magnetita, pirita, e em alguns casos, ilmenita e calcopirita. Trata-se duma faixa alongada na direção N-S, com espessura entre 900 a 1200 metros. Em geral se apresenta em contato com rochas sedimentares químicas (“chert”). Internamente algumas zonas encontram-se altamente cisalhadas, gerando zonas de argila de falha (Figura 28, Figura 29)

#### **7.2.10.2 Rochas sedimentares químicas cretáceas (kbc – wc).**

Trata-se duma série de camadas de “chert” de cor branco, cinza e preto, localizadas ao lado da rocha vulcânica, apresentando a forma de um antigo anticlinal ou camadas mais grossas alternadas de rochas vulcânicas e sedimentares. Estas camadas apresentam espessuras variáveis; na parte ocidental da área de estudo a espessura varia entre 90 a 120 metros, a orientação é N-S, com mergulhos fortes entre 70 e 80°. Na parte oriental a espessura é menor, entre 60 e 80 metros no máximo, e apresenta mergulhos verticais a subverticais, apresentando intercalações com lutitas pretas de espessuras entre 15 e 60 cm (Figura 26 e Figura 27)

#### **7.2.10.3 Rochas sedimentares clásticas cretáceas (kss).**

Estas rochas apresentam o teto da seqüência sedimentar. Sua composição é de lutitas na base, arenitos e dolomitos no meio e conglomerados na parte superior. Todas estas unidades apresentam variações no interior, encontrando-se intercalação de arenitos finos na camada de lutitas, e lutitas no meio da camada de arenitos, assim como arenitos conglomeráticos entre arenitos. Esta unidade compreende duas faixas nos extremos oriental e ocidental da zona, com espessuras maiores de 1000 metros, apresentando orientações N-S, com mergulhos fortes a leste (Figura 28, Figura 29).

#### **7.2.10.4 Depósitos quaternários (coluvião (qc) – aluvião (qal)).**

Compreendidos como deslizamentos de solo e rocha fraturada que sofrem meteorização e transporte, suavizam a topografia das cotas mais elevadas das drenagens e das margens do rio Atrato (Figura 28, Figura 29). O rio Atrato tem uma dinâmica importante na zona de estudo, e são características as corridas de massa que provocam remoção de depósitos aluviais superficiais.



**Figura 26.** Maciço rochoso com escarpa de falha, que situa o contato de rocha sedimentar clástica (Kss) com chert negro (Kbc). No declive há acumulação de coluvião (Qc) de grandes blocos.



**Figura 27.** "Chert" preto.



Figura 28. Vista panorâmica do lado norte da área de estudo, apresentando as estruturas rochosas.



Figura 29. Vista panorâmica do lado sul da área de estudo.

### 7.3 Avaliador geológico de prospecção.

Os mapas das anomalias geoquímicas da área de estudo estão apresentados na Figura 30 (a,b,c,d) e são o resultado de estudos de exploração feitos pela empresa MINER S.A e que foram compilados e digitalizados no “software” DIGER 2.0 e interpolados no “software” SURFER 7.0. No Anexo 2 são apresentados os dados de campo; na primeira e segunda coluna estão a localização da amostra e na terceira coluna os conteúdos em ppm de cada elemento explorador.

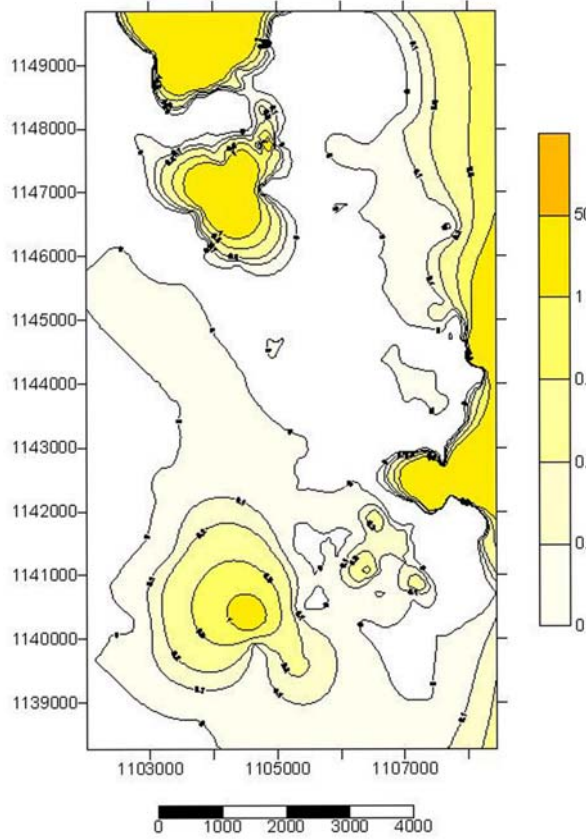
Destes mapas podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Os menores conteúdos de Au ficam na região entre os pontos com coordenadas: (1°142.000N, 1°102.000E), (1°142.000N, 1°107.000E) e (1°147.000N, 1°102.000E), (1°147.000N, 1°107.000E)
- Os menores conteúdos de Ag ficam na região entre os pontos com coordenadas: (1°140.000N, 1°102.000E), (1°140.000N, 1°105.000E) e (1°145.000N, 1°102.000E), (1°145.000N, 1°105.000E)
- Os menores conteúdos de Pb ficam na região entre os pontos com coordenadas: (1°141.000N, 1°103.000E), (1°141.000N, 1°107.000E) e (1°150.000N, 1°103.000E), (1°150.000N, 1°107.000E).
- Os menores conteúdos de Zn ficam na região entre os pontos com coordenadas: (1°141.000N, 1°103.000E), (1°141.000N, 1°105.000E) e (1°146.000N, 1°103.000E), (1°146.000N, 1°105.000E)
- A região de menor quantidade em ppm de elementos exploradores pode se limitar pelo quadrângulo de pontos: (1°142.000N, 1°103.000), (1°142.000N, 1°104.500E) e (1°147.000N, 1°103.000E), (1°147.000N, 1°104.500E)

Depois de definir estas condições geoquímicas da área de estudo, que garantem inicialmente que a barragem não será construída num local que tenha conteúdos importantes de minério, definiu-se claramente uma área de estudo resultante quase 4 vezes menor.

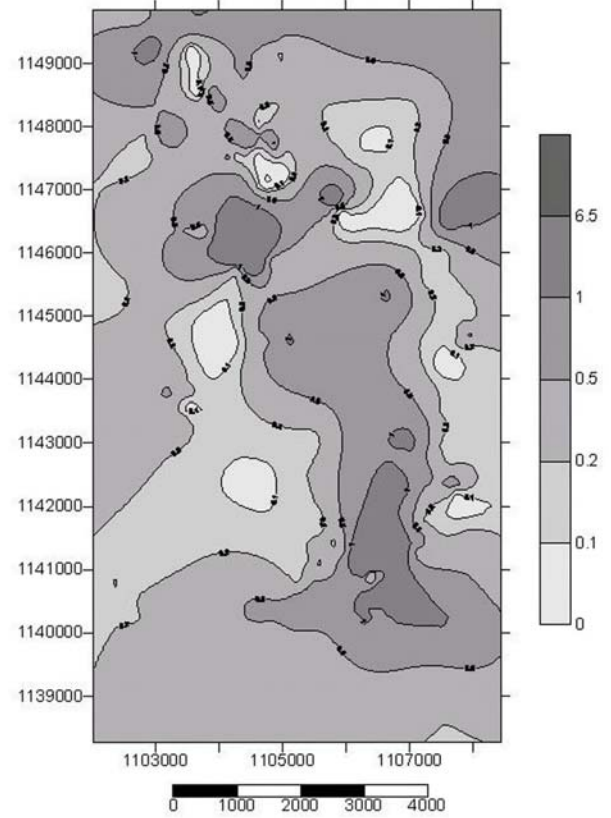
A seguir se realizou uma visita à área e se identificaram três locais para os quais será aplicado o método de análise hierárquica.

Conteúdo de Ouro em sedimentos ativos (ppm)



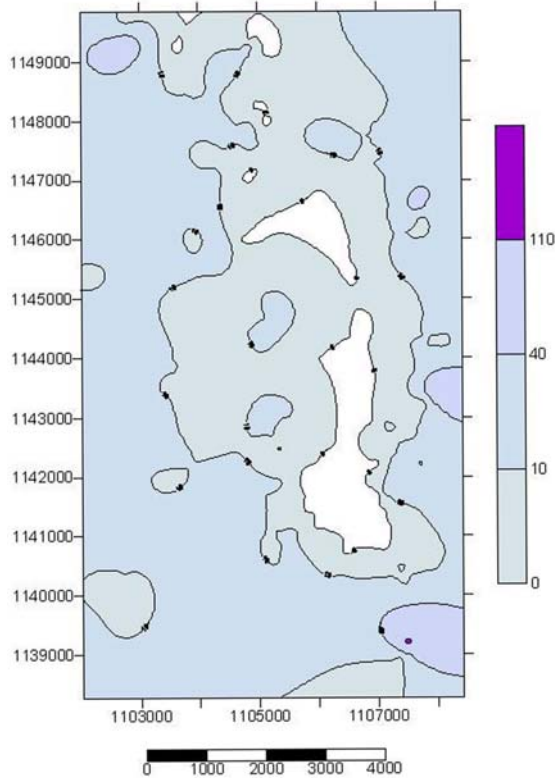
(a)

Conteúdo de Prata em sedimentos ativos (ppm)



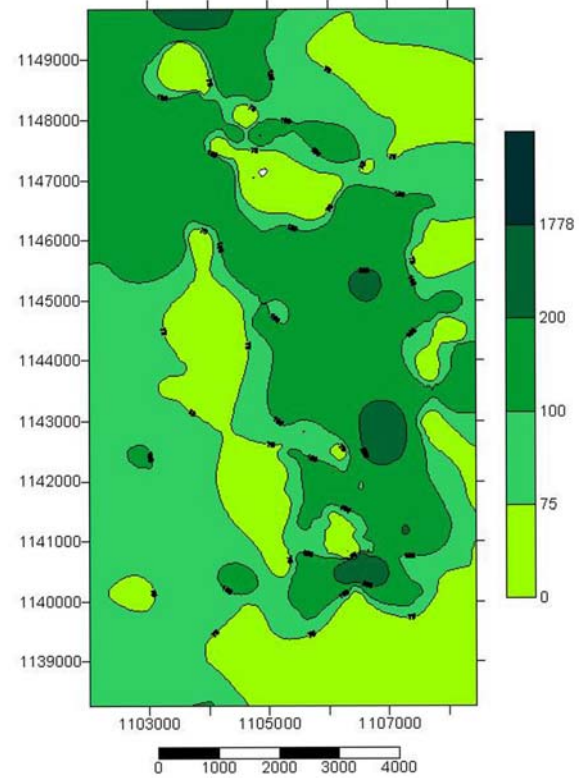
(b)

Conteúdo de Chumbo em sedimentos ativos (ppm)



(c)

Conteúdo de Zinco em sedimentos ativos (ppm)



(d)

Figura 30. Geoquímica da zona de estudo: (a) Ouro, (b) Prata, (c) Chumbo, (d) Zinco.

## 7.4 ALTERNATIVAS DE LOCAL.

Para os três locais selecionados no item 7.3 foram coletadas as informações relativas aos indicadores propostos na Tabela 17.

### 7.4.1 Local 1.

- Localização:

1°146.750N

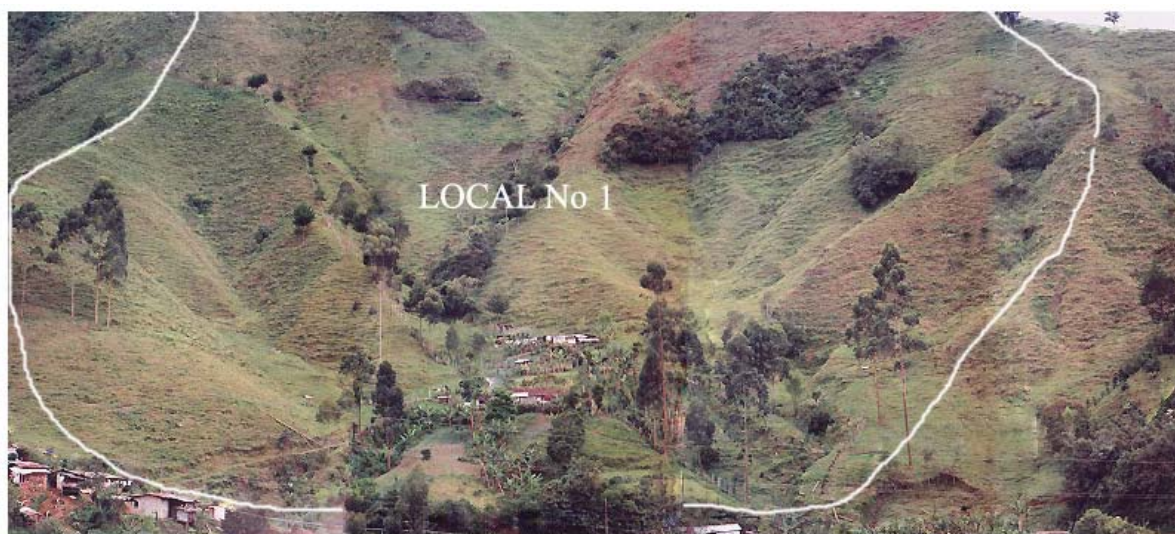
1°104.100E

Fica na margem esquerda do rio Atrato, aproximadamente a 100 metros do leito entre as cotas 1865 e 1930 acima do mar (Figura 31).

- Formas e declividade: Encosta de topo semianguloso a ondulado, de altitude 65 m e amplitude de 120 m, declividade principal na direção N-W 54% (28°). Os perfis transversais apresentam associação de encostas com perfil convexo de declividades que variam de 27 a 37° nos extremos, subordinadas a superfícies com perfil côncavo com declividades que variam de 9° a 15° nas direções N-E e S-W. Três canais de drenagem subdentrítico conformam a unidade, com vazões que variam de 6 L/s (verão) a 90 L/s (períodos de chuva). Sua forma geral é uma bacia que capta todas as águas originadas no topo.
- Litologia: A unidade é composta por rochas cretáceas sedimentares; na zona de encostas, por conglomerados, e na base da bacia, por materiais transportados do topo (coluvião). Pelas características morfológicas, os materiais inconsolidados estão medianamente evoluídos nas encostas, apresentando três horizontes: 0,2 m de solo orgânico, 4 m de solo residual jovem com fragmentos angulosos mediana a altamente intemperizados, e um terceiro horizonte saprolítico com mais de 4 m de espessura. No contato coluvião-encosta afloram lutitas e “chert” de cor preta, orientados N-35°W. O coluvião apresenta 3 horizontes: 0,1 m de material orgânico de cor café escuro; 0,6 m de solo residual jovem de areias grossas, cor café amarelo, pedregulhos angulosos e cantos rochosos angulosos; 0,3 m composto por capa de origem orgânica cor preta; e um último horizonte de 2,5 m de solo residual jovem conformado por fragmentos de pedregulhos angulosos e cantos angulosos rochosos medianamente meteorizados com diâmetros de 7 cm a 25 cm de diâmetro em seu eixo maior. Apresentam-se fragmentos de rocha vulcânica (vulcânica

porfírica) provenientes das encostas superiores, altamente meteorizados. Os níveis de água variam de 1,9 a 2,0 m nesta zona.

- Profundidade do substrato rochoso: > 20 m
- Resistência: conglomerado meteorizado: 12 MPa (rocha fraca a medianamente resistente)
- Textura: Pela análise granulométrica e pelos limites de Atterberg, o material inconsolidado apresenta textura de pedregulho siltoso (GM) (55%), areia siltosa (SM) (25%) e silte de baixa compressibilidade (ML) (20%).
- Variação vertical: Homogêneo contínuo nas encostas (predominante), e heterogêneo contínuo na base da bacia.
- Tipo de depósito: solo residual jovem (pouco evoluído pedológica e morfologicamente (predominante)) nas encostas e colúvio na base.
- Profundidade da zona saturada: nas encostas < 2m, no colúvio > 6m.
- Risco de poluição: Probabilidade de ocorrência: 3. Magnitude da poluição quando ocorre: 5. Fatores de mitigação reduzindo os potenciais impactos quando a poluição ocorre: 4. Risco de poluição = 3,75. Baixo risco de poluição.
- Unidades produtivas e de uso intensivo: não se têm unidades produtivas de uso contínuo.
- Unidades habitacionais: duas unidades habitacionais no local.
- Unidades de reflorestamento: não há. Unidades de pastagem: 150.000 m<sup>2</sup>. Unidades de agricultura: 10.075 m<sup>2</sup>. Área total de unidades de pastagem e agricultura: 160.075 m<sup>2</sup>.
- Altura da barragem com alteamentos: aproximadamente 27m



**Figura 31. Local No 1.**

- Volumes de material.

Na Tabela 20 são apresentados os volumes de material na construção da barragem e de armazenamento de rejeitos. A Figura 32 mostra a seção típica do local 1.

No estudo preliminar foram utilizadas plantas na escala 1:5000 com curvas de nível a cada 5 metros. Os cálculos de volume foram feitos em seções do local a cada 10 metros.

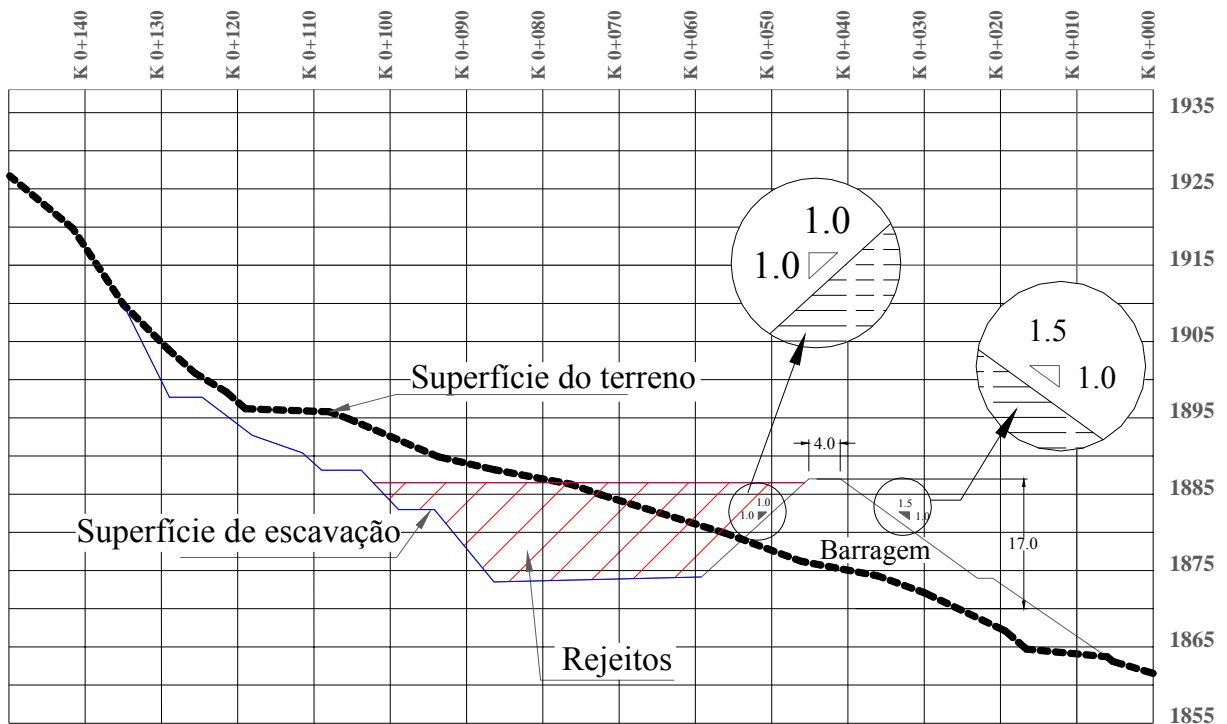
Para os ângulos de inclinação dos taludes da barragem, adotaram-se as declividades das barragens existentes. (1:1,5 à jusante e 1:1,0 à montante). A largura da crista é de 4 m.

A construção da barragem será feita com o material escavado do mesmo local, o material de decapeamento vai ser utilizado na restauração dos taludes de jusante da barragem.

O tempo de vida útil foi calculado para o enchimento do dique de arranque da barragem (sem alteamentos), com uma produção anual de rejeitos de 70.000 ton, com uma densidade média de 2ton/m<sup>3</sup> para os rejeitos.

**Tabela 20. Volumes de materiais na construção da barragem no local 1.**

Área de operação da barragem (m <sup>2</sup> x10 <sup>3</sup> )	Máxima altura do dique inicial (m)	Armazenamento de rejeitos na primeira etapa (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Tempo de vida útil (anos)	Corpo do dique de arranque (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Total movimento de terra (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )
51	12	82	2,3	60	67,6



**Figura 32. Perfil local No 1.**

### 7.4.2 Local 2.

- Localização:

1°145.800N

1°103.450E

Fica na margem direita do rio Atrato, próximo ao rio, entre as cotas 1770 a 1850 acima do mar (Figura 33).

- Formas e declividade: Encosta de topo levemente arredondado, de altitude 90 m e amplitude de 220 m, declividade com direção S-E 40% (22°), as encostas de perfil convexo subordinadas a perfis côncavos. O perfil transversal apresenta uma superfície levemente inclinada de 5% (3°) com direção S-W. Apresenta dois canais de drenagem, um retilíneo e outro subdentítico com vazões não muito significativas (< 5 L/s).
- Litologia: A unidade esta composta por rochas cretáceas sedimentares, arenitos sob lutitas em toda a zona de encostas. Na base da bacia, depósitos de coluvião misturados com depósitos de aluvião por efeitos de corridas de massa do rio Atrato. Pelas características morfológicas, nas encostas os materiais inconsolidados estão medianamente evoluídos, apresentando quatro horizontes: 0,2 m de solo orgânico, 0,5 m de solo residual maduro, solo residual jovem de 1,8 m de espessura e um horizonte de saprolito com mais de 4 m de espessura. Nas partes baixas, o solo está conformado por uma mistura de materiais transportados pelo rio e outros depositados pelos movimentos de massa das encostas, com grande quantidade de rochas arredondadas de diâmetro entre 20 e 50 cm, em matriz de arenitos argilosos de grão fino.
- Profundidade: do substrato rochoso: > 10 m nas encostas, e material quaternário na bacia.
- Resistência: Arenito meteorizado: 24 MPa (rocha fraca a medianamente resistente)
- Textura: Pela análise granulométrica dos materiais inconsolidados das encostas, apresenta características texturais de areia siltosa (SM).
- Variação vertical: Homogêneo contínuo na encosta (predominante), heterogêneo descontínuo na base da bacia.
- Tipo de depósito: solo residual jovem (pouco evoluído pedológica e morfologicamente) nas encostas e na base mistura aluvião (no limite com o rio) – coluvião (predominante).
- Profundidade da zona saturada: nas encostas < 2m, na parte baixa < 4 m.
- Risco de poluição: Probabilidade de ocorrência: 5. Magnitude da poluição quando ocorre: 5. Fatores de mitigação reduzindo os potenciais impactos quando a poluição ocorre: 5. Risco de poluição = 5,0. Médio risco de poluição.

- Unidades produtivas e de uso intensivo: há uma unidade produtiva (leite, queijo e seus derivados) de 12.600 m<sup>2</sup>.
- Unidades habitacionais: quatro unidades habitacionais no local.
- Unidades de reflorestamento: não há. Unidades de pastagem: 90.000 m<sup>2</sup>. Unidades de agricultura: não há. Área total de unidades de pastagem, agricultura e reflorestamento: 90.000 m<sup>2</sup>.
- Altura da barragem com alteamentos: aproximadamente 39m



**Figura 33. Local No 2.**

- Volumes de material.

Na Tabela 21 estão apresentados os volumes de material na construção da barragem e de armazenamento de rejeitos. A Figura 34 apresenta a seção típica do local 2.

No estudo preliminar foram utilizadas plantas na escala 1:5000 com curvas de nível a cada 5 metros. Os cálculos de volume foram feitos em seções do local a cada 10 metros.

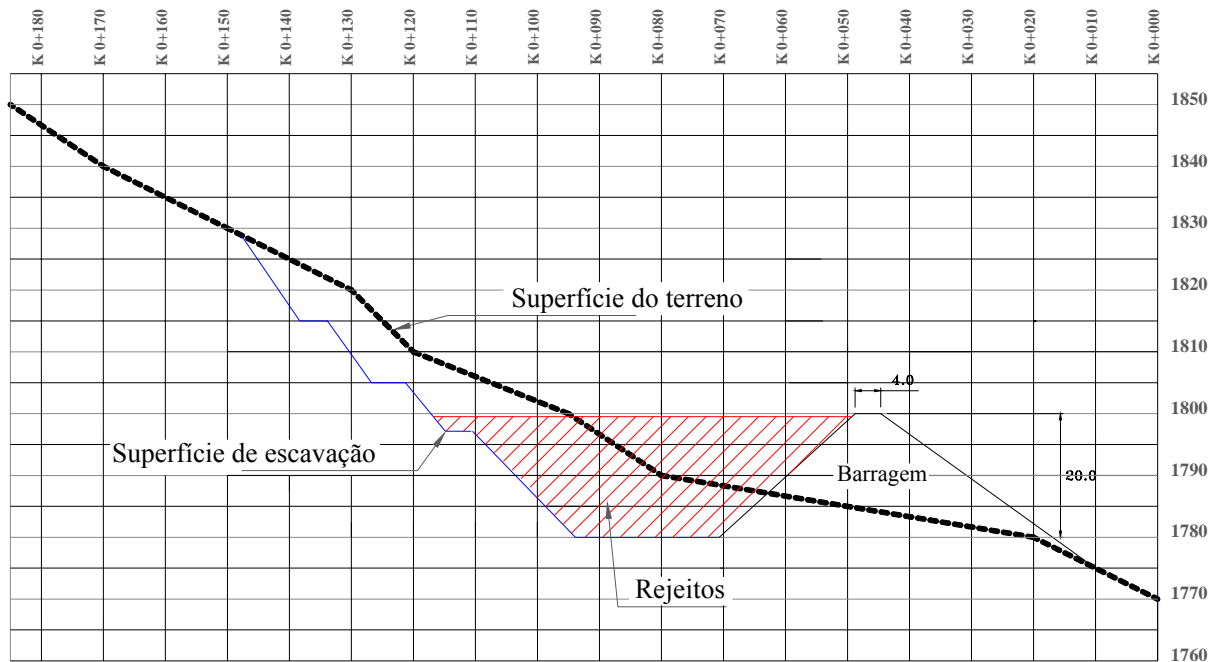
Para os ângulos de inclinação dos taludes da barragem, adotaram-se as declividades das barragens existentes. (1:1,5 à jusante e 1:1,0 à montante). A largura da crista é de 4 m.

A construção da barragem será feita com o material escavado do mesmo local e quando for necessário se utilizará material de empréstimo que fica a 1Km do local. O material de decapeamento vai ser utilizado na restauração dos taludes de jusante da barragem.

O tempo de vida útil foi calculado para o enchimento do dique de arranque da barragem (sem alteamentos), com uma produção anual de rejeitos de 70.000 ton com uma densidade média de 2ton/m<sup>3</sup> para os rejeitos.

**Tabela 21. Volumes de materiais na construção da barragem no local 2.**

Área de operação da barragem ( $m^2 \times 10^3$ )	Máxima altura do dique inicial (m)	Armazenamento de rejeitos na primeira etapa ( $m^3 \times 10^3$ )	Tempo de vida útil (anos)	Corpo do dique de arranque ( $m^3 \times 10^3$ )	Total movimento de terra ( $m^3 \times 10^3$ )
78	20	111	3,2	54	60,3

**Figura 34. Perfil local No 2.**

### 7.4.3 Local 3.

- Localização:

1°145.000N.

1°103.500E

Fica na margem direita do rio Atrato, próximo ao rio, entre as cotas 1730 a 1800 acima do mar (Figura 35).

- Formas e declividade: Encosta de topo levemente anguloso, de altitude 80 m e amplitude de 245 m, declividade com direção S-E 31% (17°), encosta com inclinação moderada e perfil côncavo. O perfil transversal apresenta uma superfície levemente inclinada menor de 5% (3°) com direção S-W, é uma planície de aproximadamente 400 m de comprimento por 30 m de largura. Não apresenta canais de drenagem.
- Litologia: A unidade está composta por rochas cretáceas sedimentares, arenitos na zona de encostas e na base da encosta, um grande depósito produto de movimentos de massa das encostas. Pelas características morfológicas, nas encostas os materiais inconsolidados

estão relativamente evoluídos, apresentando quatro horizontes: 0,3 m de solo orgânico, 0,8 m de solo residual maduro, solo residual jovem de 4 m e um horizonte de saprolito mais espesso que 6 m. Nas partes baixas, o material inconsolidado apresenta um coluvião homogêneo; na base do coluvião aparecem depósitos de aluvião, composto por rochas de grande diâmetro (> 5 m), arredondadas com matriz areno-argilosa.

- Profundidade: do substrato rochoso: > 15 m nas encostas, e material quaternário na bacia.
- Resistência: Arenito meteorizado: 24 MPa (rocha fraca a medianamente resistente)
- Textura: Pela análise granulométrica dos materiais inconsolidados das encostas, apresenta características texturais de areia siltosa (SM).
- Variação vertical: Homogêneo contínuo na encosta e heterogêneo contínuo na base da bacia (predominante).
- Tipo de depósito: solo residual jovem (pouco evoluído pedológica e morfologicamente) nas encostas e na base aluvião (no limite com o rio, predominante) – coluvião.
- Profundidade da zona saturada: nas encostas < 4m; na zona baixa, apresenta zonas úmidas na zona sul; pouca declividade faz que não seja bem drenado.
- Risco de poluição: Probabilidade de ocorrência: 3. Magnitude da poluição quando ocorre: 5. Fatores de mitigação reduzindo os potenciais impactos quando a poluição ocorre: 4. Risco de poluição = 3,75. Baixo risco de poluição.
- Unidades produtivas e de uso intensivo: não há.
- Unidades habitacionais: não há.
- Unidades de reflorestamento: não há. Unidades de pastagem: 150.500 m<sup>2</sup>. Unidades de agricultura: não há. Área total de unidades de pastagem, agricultura e reflorestamento: 150.500 m<sup>2</sup>.
- Altura da barragem com alteamentos: aproximadamente 48m
- Volumes de material.

Na Tabela 22 estão apresentados os volumes de material na construção da barragem e de armazenamento de rejeitos. A Figura 36 mostra a seção típica do local. Utiliza-se o talude natural sem construção de barragem nos primeiros 150 metros N-S do local; nos outros 250 metros é necessária a construção dos 7 metros finais, até a crista da barragem. É importante ressaltar que o material escavado é maior do que o material usado na construção da barragem, podendo-se armazenar para futuros alteamentos.

No estudo preliminar foram utilizadas plantas na escala 1:5000 com curvas de nível a cada 5 metros. Os cálculos de volume foram feitos em seções do local a cada 10 metros.



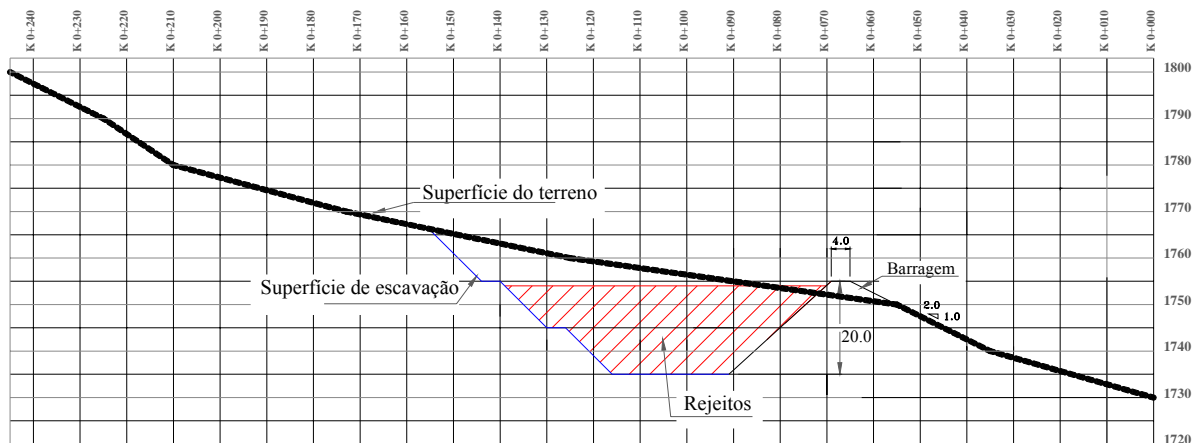
**Figura 35. Local No 3.**

Para os ângulos de inclinação dos taludes da barragem, adotaram-se as declividades de 1:1,1 à jusante e 1:2 à montante). A largura da crista é de 4 m.

O tempo de vida foi calculado para o enchimento do dique de arranque da barragem (sem alteamentos), com uma produção anual de rejeitos de 70.000 ton, com uma densidade média de 2ton/m<sup>3</sup> para os rejeitos.

**Tabela 22. Volumes de materiais na construção da barragem no local 3.**

Área de operação da barragem (m <sup>2</sup> x10 <sup>3</sup> )	Máxima altura do dique inicial (m)	Armazenamento de rejeitos na primeira etapa (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Tempo de vida útil (anos)	Corpo do dique de arranque (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )
90	20	312	9,0	296,8



**Figura 36. Perfil local No 3.**

## **8 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA NO ESTUDO DE CASO**

Como visto no Capítulo 6, definiram-se indicadores para a seleção de locais de barragens de rejeitos, reduziu-se a área de estudo após a prospecção geoquímica, selecionaram-se três áreas alternativas, e obtiveram-se as informações necessárias a respeito de cada área alternativa. Neste capítulo será aplicado o método de análise hierárquica para auxiliar na tomada de decisões sobre o local mais apropriado para a construção de uma barragem de rejeitos na área de estudo localizada no município do Carmen de Atrato, Colômbia.

A aplicação do AHP não só sugere um local para a construção da barragem de rejeitos, como também permite uma visão geral do problema para o tomador de decisões. Os pesos das alternativas obtidos pelo AHP são a seguir confrontados com os custos.

### **8.1 Definição de critérios e sub critérios.**

No estudo de caso, são dois os elementos que vão ser avaliados segundo a quantidade de informações disponíveis sobre os locais, quais sejam: custos e menor impacto ambiental.

O objetivo da estrutura hierárquica é avaliar o local que gera o menor impacto ambiental na zona, assim o resultado da avaliação gera um vetor de pesos de importância, onde o maior valor é o local que gera o menor impacto ambiental. Os custos são avaliados fora da estrutura hierárquica (ver item 8.7) e confrontados com ela posteriormente.

Os critérios avaliados, que são as ocorrências que geram potencialmente impacto ambiental, foram definidos como: Implantação da Barragem, Ruptura da Barragem e Transporte de Rejeitos ao Local. Esses critérios estão divididos em sub-critérios, que são os elementos do meio ambiente que recebem potencialmente impacto: fauna, flora, ocupação humana, água, ar e solo. No último nível da hierarquia estão as alternativas de local.

Por simples que pareça a hierarquia, ele envolve todos os indicadores definidos na Tabela 17, além de estudos realizados na zona a nível regional e local, como mostra a Tabela 23:

**Tabela 23. Relação de critérios e sub-critérios com indicadores propostos.**

Critérios	Sub-critérios	Relação com indicadores da Tabela 17 e estudos da região
Ruptura da barragem (impactos à jusante por possível ruptura da barragem) <b>Objetivo:</b> local com menor impacto pela eventual ruptura.	Flora	Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensíveis Unidades de vegetação nativa (estudos regionais)
	Fauna	Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensíveis (estudos regionais)
	Ocupação humana	Unidades produtivas e de uso intensivo, Unidades habitacionais, Unidades de reflorestamento, pastagem e agricultura. (estudos locais e regionais)
	Água	Interferências com recursos hídricos (estudos regionais)
	Ar	Impactos na qualidade do ar (estudos locais)
	Solo	Relevo e impactos no uso do solo (estudos locais e regionais)
Transporte de rejeitos ao local (impactos por possíveis rupturas de tubulações no transporte de rejeitos ao local da barragem) <b>Objetivo:</b> Local que gere menor impacto no transporte de rejeitos	Flora	Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensíveis Unidades de vegetação nativa (estudos regionais)
	Fauna	Ecossistemas sensíveis (estudos locais)
	Ocupação humana	Unidades produtivas e de uso intensivo, Unidades habitacionais, Unidades de reflorestamento, pastagem e agricultura. (estudos locais)
	Água	Interferências com recursos hídricos (estudos locais)
	Ar	Possíveis impactos na qualidade do ar (estudos locais)
	Solo	Relevo e impactos no uso do solo (estudos locais)
Implantação da barragem (impactos no local pela implantação da barragem de rejeitos e reservatório) <b>Objetivo:</b> Local que por sua própria implantação gere o menor impacto.	Flora	Unidades de parques nacionais, ecossistemas sensitivos Unidades de vegetação nativa (estudos regionais)
	Fauna	ecossistemas sensitivos (estudos locais)
	Ocupação humana	Unidades produtivas e de uso intensivo, Unidades habitacionais, Unidades de reflorestamento, pastagem e agricultura. (estudos locais)
	Água	Águas subterrâneas (estudos locais), substrato rochosos, materiais inconsolidados (estudos locais)
	Ar	Possíveis impactos na qualidade do ar (estudos locais)
	Solo	Substrato rochoso, materiais inconsolidados, processos, relevo (estudos locais).

No estudo de caso se observa que cada local não está necessariamente sujeito ao impacto potencial relativo a todos os sub-critérios, pelas características regionais (como no caso do ar) ou pelas características do próprio local, como mostrado na Tabela 24.

**Tabela 24 Critérios e sub-critérios que vão ser avaliados para o estudo de caso.**

Critério	Sub-critério	Descrição para os Locais 1, 2 e 3
Ruptura da barragem	Fauna	O impacto gerado na fauna da drenagem principal (rio Atrato) é igual para todos os locais e significativo no contexto do problema.
	Flora	Em caso de ruptura, não há unidades de vegetação nativa afetadas.
	Ocupação humana	Existem impactos diferenciados para os três locais, sendo maior para o local 3 por sua proximidade com o município de Carmen de Atrato.
	Água	O impacto gerado na drenagem principal é igual para os três locais.
	Ar	Pelas condições climáticas da zona de estudo (umidade relativa alta, velocidade do vento baixa e alta pluviometria), o impacto no ar é igualmente desprezível para todos os locais.
	Solo	Pelas características do relevo e da bacia hidrográfica, o impacto no solo não é significativo para os três locais; a massa de resíduos escoará pela drenagem.
Transporte de rejeitos ao local	Fauna	O impacto não é significativo, por diferentes motivos: - o transporte é feito em tubulação por gravidade, que é protegida por tubulações metálicas quando passa por áreas de pastagem, agricultura ou reflorestamento. - Rupturas na tubulação são detectadas e solucionadas imediatamente. O impacto na fauna e flora, portanto, é igualmente desprezível em todos os locais.
	Flora	
	Ocupação humana	O impacto é diferenciado para cada local, pela distância da usina de beneficiamento até a barragem e pela quantidade de moradias que poderiam ser afetadas por ruptura da tubulação em zonas sem proteção.
	Água	O impacto é diferenciado para cada local pela quantidade de cursos de água afetados se ocorrer ruptura da tubulação.
	Ar	Desprezível, pelos mesmos motivos relacionados na ruptura de barragem.
	Solo	O impacto é diferenciado para cada local, em função do comprimento da tubulação e da distância à usina de beneficiamento.
Implantação da barragem e respectivo reservatório	Fauna	Não há impacto significativo nos locais, pois não há flora e fauna nativas (ver item 7.4).
	Flora	
	Ocupação humana	O impacto é diferenciado para cada local, em função da ocupação do solo.
	Água	O impacto é diferenciado para cada local em relação às águas subterrâneas, em função da profundidade do lençol freático.
	Ar	Desprezível, pelos mesmos motivos relacionados na ruptura de barragem.
	Solo	O impacto é diferenciado para cada local, em função das características do substrato rochoso.

## 8.2 Hierarquização do problema.

A hierarquia foi baseada na lista de critérios e sub-critérios propostos na Tabela 24 e está apresentada na Figura 37.

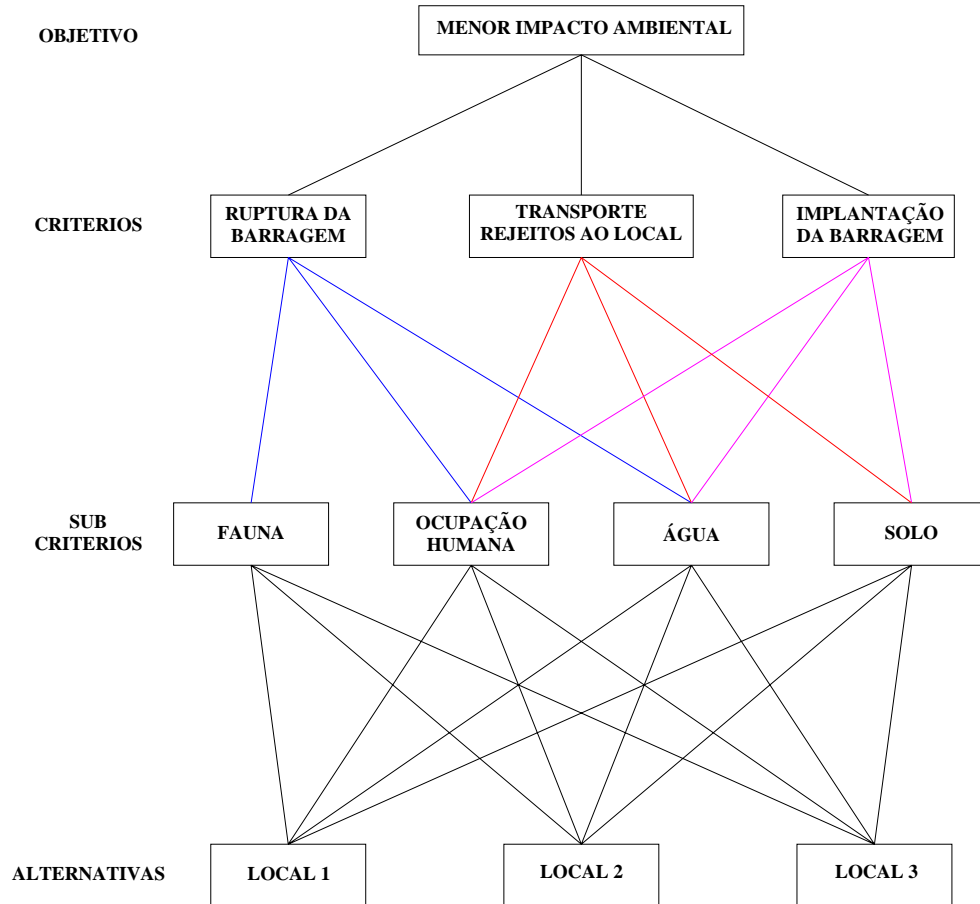


Figura 37. Hierarquia de ajuda na decisão de seleção de locais no estudo de caso.

A hierarquia do estudo de caso é uma hierarquia incompleta, pois nem todos os sub-critérios se relacionam com todos os critérios, por exemplo, não há ligação entre o sub-critério Solo e o critério Ruptura da Barragem, ou do sub-critério Fauna com o critério Transporte de Rejeitos ao Local. Porém, uma hierarquia incompleta pode ser tratada como completa, usando zero onde não existem relações (Saaty 1980), como pode ser observado na Tabela 29.

## 8.3 Julgamentos paritários, prioridades relativas e consistência.

Nesta etapa são feitos os julgamentos entre critérios, sub-critérios e atributos, atribuindo os valores de julgamentos relativos propostos por Saaty (1980) na Tabela 14. As matrizes pareadas são construídas comparando-se a preferência de um elemento em relação ao outro.

A Tabela 25 representa a matriz pareada do nível 2, composto pelos seguintes critérios: Ruptura da Barragem (RB), Transporte de Rejeitos ao Local (TR), Implantação da Barragem (IB). representa a matriz pareada do nível 2, composto pelos seguintes critérios: Ruptura da barragem (RB), Transporte de rejeitos ao local (TR), Implantação da barragem (IB). Na Tabela 26 são apresentadas as matrizes pareadas do nível 3, composto pelos sub-critérios: Fauna (F), Ocupação humana (OH), água (A) e solo (S). Nas tabelas estão também apresentados os autovetores e o produto da matriz pareada pelo autovetor.

**Tabela 25. Matriz pareada do nível 2.**

	<b>RB</b>	<b>TR</b>	<b>IB</b>	<b>Autovetor (C)</b>	<b>A C</b>
<b>RB</b>	<b>1</b>	1/7	1/3	0,09	0,25
<b>TR</b>	7	<b>1</b>	5	0,72	2,27
<b>IB</b>	3	1/5	<b>1</b>	0,19	0,59
Soma				1,00	

$$\lambda_{\text{máx}} = 3,07; \text{IC} = 0,03; \text{RC} = 0,06$$

**Tabela 26. Matrizes pareadas do nível 3.**

Nível 2	(1)	(2)	(3)	Autovetor	A C
Ruptura da Barragem					
(1) Fauna (F)	<b>1</b>	1	1/2	0,23	0,71
(2) Ocupação humana (OH)	1	<b>1</b>	1/4	0,19	0,57
(3) Água (A)	2	4	<b>1</b>	0,58	1,79
				$\lambda_{\text{máx}} = 3,05$	IC = 0,03 RC = 0,05
Transporte de rejeitos ao local					
(1) Ocupação humana (OH)	<b>1</b>	1/3	3	0,26	0,79
(2) Água (A)	3	<b>1</b>	5	0,63	1,95
(3) solo (S)	1/3	1/5	<b>1</b>	0,11	0,32
				$\lambda_{\text{máx}} = 3,04$	IC = 0,02 RC = 0,03
Implantação da Barragem					
(1) Ocupação humana (OH)	<b>1</b>	1/5	1/7	0,08	0,22
(2) Água (A)	5	<b>1</b>	1/3	0,28	0,87
(3) solo (S)	7	3	<b>1</b>	0,64	2,01
				$\lambda_{\text{máx}} = 3,07$	IC = 0,03 RC = 0,06

A Tabela 27 mostra as matrizes pareadas do nível 4, que corresponde às alternativas de local.

**Tabela 27. Matrizes pareadas do nível 4.**

Nível 3	(1)	(2)	(3)	Autovetor	A C
<b>Fauna</b>					
(1) Local 1 (L1)	<b>1</b>	1	1	0,33	1,00
(2) Local 2 (L2)	1	<b>1</b>	1	0,33	1,00
(3) Local 3 (L3)	1	1	<b>1</b>	0,33	1,00
				$\lambda_{\text{máx}}=3,00$	IC = 0,00 RC = 0,00
<b>Ocupação humana</b>					
(1) Local 1 (L1)	<b>1</b>	4	5	0,67	2,11
(2) Local 2 (L2)	1/4	<b>1</b>	3	0,23	0,71
(3) Local 3 (L3)	1/5	1/3	<b>1</b>	0,10	0,31
				$\lambda_{\text{máx}}=3,09$	IC = 0,04 RC = 0,07
<b>Água</b>					
(1) Local 1 (L1)	<b>1</b>	1/3	3	0,27	0,83
(2) Local 2 (L2)	3	<b>1</b>	4	0,61	1,90
(3) Local 3 (L3)	1/3	1/4	<b>1</b>	0,12	0,36
				$\lambda_{\text{máx}}=3,07$	IC = 0,04 RC = 0,06
<b>Solo</b>					
(1) Local 1 (L1)	<b>1</b>	2	1/5	0,19	0,59
(2) Local 2 (L2)	1/2	<b>1</b>	1/4	0,13	0,40
(3) Local 3 (L3)	5	4	<b>1</b>	0,68	2,16
				$\lambda_{\text{máx}}=3,10$	IC = 0,05 RC = 0,08

#### 8.4 Agregação de prioridades às alternativas.

Os autovetores gerados para cada uma das matrizes são agrupados até obter os pesos finais para cada uma das alternativas, onde o maior peso corresponde à alternativa que gera o menor impacto ambiental. O autovetor da primeira matriz (nível critérios) encontra-se na Tabela 28.

**Tabela 28. Autovetor da matriz do nível 2.**

RB	0.08
TR	0.72
IB	0.19

Os autovetores da segunda matriz (nível sub-critérios) estão apresentados na Tabela 29.

**Tabela 29. Autovetores da matriz do nível 3.**

	RB	TR	IB
F	0.23	0.00	0.00
OH	0.19	0.26	0.07
A	0.58	0.63	0.28
S	0.00	0.11	0.64

Os autovetores da terceira matriz (alternativas) estão apresentados na Tabela 30.

**Tabela 30. Autovetores da matriz do nível 4.**

	F	OH	A	S
L1	0.33	0.67	0.27	0.19
L2	0.33	0.23	0.61	0.13
L3	0.33	0.10	0.12	0.68

O vetor final de menor impacto ambiental obtido pelo produto matricial dos componentes das alternativas – sub–critérios – critérios é dado pela Tabela 31.

**Tabela 31. Vetor final de menor impacto ambiental.**

LOCAL 1	0.34
LOCAL 2	0.42
LOCAL 3	0.23

Segundo esta escala de pesos, ao Local 2 corresponderia o menor impacto na construção da barragem de rejeitos, a seguir o Local 1 e por último o Local 3, que seria o de maior impacto ambiental.

### 8.5 Aplicação da variante multiplicativa do método de análise hierárquica.

Neste item serão comparados os dados obtidos no vetor de pesos finais com a versão multiplicativa do AHP (ver item 5.7), para confirmar a classificação das alternativas. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** estão expostos os pesos da matriz de comparações encontrados no estudo de caso.

Tabela 32. Critérios e alternativas na variante multiplicativa do método AHP.

ALTERNATIVA	CRITÉRIO		
	RB	TR	IB
	(0.08	0.72	0.19)
<b>Local 1</b>	0.36	0.37	0.25
<b>Local 2</b>	0.47	0.46	0.27
<b>Local 3</b>	0.17	0.17	0.48

Aplicando a equação (17) aos dados Tabela 32 da obtém-se, para comparar as alternativas Local 1 e Local 2, os resultados da equação (18):

$$R\left(\frac{L_1}{L_2}\right) = \left(\frac{0.36}{0.47}\right)^{0.08} \times \left(\frac{0.37}{0.46}\right)^{0.72} \times \left(\frac{0.25}{0.27}\right)^{0.19} \quad (18)$$

$$R\left(\frac{L_1}{L_2}\right) = \mathbf{0.82}$$

Isto significa que o Local 1 é de menor peso que o Local 2 (Local 1 < Local 2).

A equação (19) resultados da avaliação do par de alternativas Local 2 e Local 3.

$$R\left(\frac{L_2}{L_3}\right) = \left(\frac{0.47}{0.17}\right)^{0.08} \times \left(\frac{0.46}{0.17}\right)^{0.72} \times \left(\frac{0.27}{0.48}\right)^{0.19} \quad (19)$$

$$R\left(\frac{L_2}{L_3}\right) = \mathbf{1.97}$$

Isto significa que o peso do Local 2 é maior do que o peso do Local 3 (Local 2 > Local 3). Finalmente a avaliação do par de alternativas Local 1 e Local 3 é mostrada na equação (20).

$$R\left(\frac{L_1}{L_3}\right) = \left(\frac{0.36}{0.17}\right)^{0.08} \times \left(\frac{0.37}{0.17}\right)^{0.72} \times \left(\frac{0.25}{0.48}\right)^{0.19} \quad (20)$$

$$R\left(\frac{L_1}{L_3}\right) = 1.61$$

Isto significa que o Local 1 é de maior peso que o Local 3 (Local 1 > Local 3).

A variante multiplicativa confirmou os resultados obtidos na análise hierárquica, acentuando as diferenças entre as alternativas.

### 8.6 Análise de sensibilidade

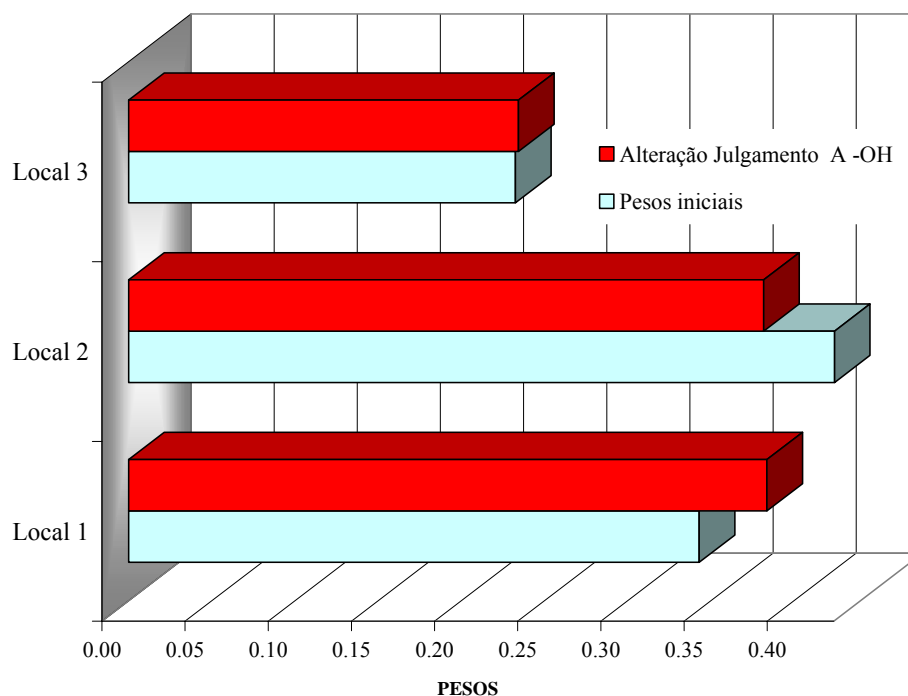
A sensibilidade da estrutura é analisada modificando-se os pesos de alguns elementos da estrutura hierárquica e agregando-se critérios ou sub-critérios.

Avaliou-se a alteração dos julgamentos paritários relativos ao sub-critério Água em cada um dos critérios, considerando-o mais vulnerável aos impactos, para simular uma situação de pressão de organismos ambientais fiscalizadores dos recursos hídricos, ou organizações não-governamentais ambientalistas, ou mesmo a comunidade local. A hierarquia foi recalculada colocando peso menor para a água nas comparações paritárias, ou seja, maior impacto.

Para o critério Ruptura da Barragem, nenhuma alteração nos pesos dos julgamentos paritários resultou numa mudança de pesos finais das alternativas, mesmo quando os julgamentos paritários entre Água e Fauna e Água e Ocupação Humana passaram de, respectivamente, importância pequena (2:1) e importância forte (4:1) da primeira sobre a segunda (A:F e A:OH), para importância absoluta da segunda em relação à primeira (1:9).

Para o critério Transporte de Rejeitos ao Local, alterações nos julgamentos causaram uma preferência pelo Local 1, que passou a ser o de menor impacto ambiental. A Figura 38 (cálculos no Anexo 3) mostra o caso em que os pesos finais dos Locais 1 e 2 se igualam, pela simples modificação do julgamento paritário entre Água e Ocupação Humana, que passou de importância pequena (1:3) da segunda sobre a primeira (A:OH) para igual importância (1:1). Esse se mostrou o julgamento que mais influi neste critério, e em toda a hierarquia. As

alterações no julgamento paritário entre Água e Solo, embora também influam nos pesos finais das alternativas, tem influência muito menor.



**Figura 38. Alteracion Julgamento Água – Ocupação Humana.**

Para o critério Implantação da Barragem, nenhuma alteração nos pesos dos julgamentos paritários resultou numa mudança de pesos finais das alternativas, mesmo quando os julgamentos paritários entre Água e Fauna e Água e Ocupação Humana passaram de, respectivamente, importância forte da primeira sobre a segunda (5:1) para importância forte da segunda sobre a primeira (1:5), e de importância pequena (1:3) para importância absoluta da segunda em relação à primeira (1:9).

A análise de sensibilidade neste exemplo revela que, por mais vulnerável que se considere o sub-critério Água, o Local 2 é o de menor impacto ambiental, e o Local 1 só passa a ser preferido quando se considera o Transporte de Rejeitos ao Local. Este critério, contudo, é o de menor importância entre os três critérios na hierarquia.

### **8.7 Considerações de custos dos locais**

O custo total de implantação de uma barragem de rejeitos depende de diversos fatores, tais como: o custo do terreno, os custos de escavação, os custos de terraplenagem, os custos de

transporte de polpa ao local, as indenizações, os custos de acesso aos locais, os custos de tratamento dos efluentes, os custos de transporte de efluentes, os custos de restauração, entre outros (Johnston 1973).

Também os custos operacionais, os custos de manutenção e de fechamento deveriam ser avaliados, mas são muito difíceis de prever, já que dependem muito do tempo das operações da jazida. As empresas mineradoras em geral não projetam custos para o fechamento da barragem, que no entanto podem ser muito elevados. Neste sentido uma recomendação importante é distribuir os custos operacionais durante a vida útil da barragem, aplicando-os na manutenção das estruturas, para haver menores gastos no fechamento (McPhail 2006).

No estudo de caso o custo inicial total é trabalhado sob três aspectos:

- Custos do terreno ( $C_{Te} = C_{te} + C_{uh} + C_{up}$ )
- Custos de escavação ( $C_{es}$ )
- Custos do aterro ( $C_{at}$ )

Onde  $C_{te}$ ,  $C_{uh}$ , e  $C_{up}$  são os custos do terreno, os custos das unidades habitacionais e os custos das unidades produtivas, respectivamente.

Todos os locais ficam numa cota inferior à usina de beneficiamento, e o transporte de polpa é feito por gravidade, não precisando de bombeamento. Então, os custos de transporte de polpa limitam-se aos custos da tubulação e aos custos de instalação (mão de obra, equipamento e materiais), podendo ser incluídos nos custos de operação da mina sem ser muito significativos no custo total inicial da barragem. Como apresentado na Tabela 18, os efluentes das barragens apresentam boas características e não precisam de tratamento químico.

O custo total (CT) está representado pela equação (21)

$$CT = C_{te} + C_{uh} + C_{up} + C_{es} + C_{at} \quad (21)$$

Nos item 7.4.1, 7.4.2 e 7.4.3 foram calculados os volumes de escavação e de terraplenagem para cada local; aqui se adicionam as unidades habitacionais e as unidades produtiva de cada local, resumidos na Tabela 33. É importante observar que a área do terreno a ser comprado é muito maior do que a área de influência da barragem, pois geralmente os proprietários não

vendem parte de seu terreno para continuar ocupando a outra parte não soterrada pelo reservatório; eles, infelizmente para a mineradora, vendem toda sua propriedade.

**Tabela 33. Áreas, volumes, movimentos de terra e escavações nos diferentes locais.**

	Área do local a ser comprada (m <sup>2</sup> x10 <sup>3</sup> )	Escavação (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Construção da barragem (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Unidades habitacionais (m <sup>2</sup> )	Unidades produtivas (m <sup>2</sup> )
LOCAL 1	160	82	67,6	2 casas (190 m <sup>2</sup> )	0
LOCAL 2	102	111	60,3	4 casas (280 m <sup>2</sup> )	1 unidade (150 m <sup>2</sup> )
LOCAL 3	150	299	0,0	0	0

Deve-se lembrar que, no Local 3, a barragem vai ficar encaixada e não sobre a superfície original do terreno, como nos Locais 1 e 2. O item “Construção da barragem” refere-se só a trabalhos de aterramento.

### 8.7.1 Custos dos terrenos

Os custos dos terrenos ( $C_{Te}$ ) foram baseados no estudo feito por Quintero (2006), onde se calcula o valor do terreno considerando não só o preço por m<sup>2</sup>, como também incorporando os atributos físicos, geográficos e/ou do entorno do prédio. É definido um valor da terra como recurso potencial agrícola: terrenos com baixa declividade e água suficiente apresentam custos médios altos, e para terrenos em encostas íngremes os preços são menores. Este estudo foi feito analisando aproximadamente 14% das propriedades rurais da Colômbia (395.550 propriedades com informações de clima, inclinação do terreno, custo potencial do terreno, uso do solo, disponibilidade de água e tipo de estradas vizinhas). Na Tabela 34 constam os resultados desse estudo, supondo-se um mesmo valor potencial do solo.

**Tabela 34. Características médias das propriedades rurais com igual valor potencial do solo (Quintero 2006, modificada para reais (R\$)).**

Características	IGUAL VALOR POTENCIAL DO SOLO								
	0,05	R\$ / m <sup>2</sup>	0,05	R\$ / m <sup>2</sup>	0,05	R\$ / m <sup>2</sup>	0,05	R\$ / m <sup>2</sup>	
Inclinações	Levemente íngreme		Inclinações	Levemente íngreme		Inclinações		Levemente íngreme	
Disponibilidade de água	Escassa				Disponibilidade de água				

Nota: 1US\$ = 2,17R\$ (set/2006)

Quintero (2006) não considera a infra-estrutura existente no local (unidades habitacionais, barragens, currais, unidades produtivas, entre outras), a qual tem que ser avaliada à parte e adicionada aos custos do terreno.

Os custos de terreno para os Locais 1 e 2 flutuam entre 0,12 R\$/m<sup>2</sup> e 0,25 R\$/m<sup>2</sup>, e para o Local 3, entre 0,25 R\$/m<sup>2</sup> e 0,32 R\$/m<sup>2</sup>. Optou-se pelos valores máximos na análise, considerando o poder de negociação dos proprietários. Assim, os custos de terreno para os Locais 1, 2 e 3 são, respectivamente, R\$40.000, R\$ 22.500 (para o Local 2 só se considerou a área de 90.000m<sup>2</sup> do terreno, os outros 12.600 m<sup>2</sup> pertencentes à unidade produtiva são calculados mais adiante) e R\$48.000.

#### **8.7.1.1 Custos das unidades habitacionais.**

Tomou-se como base o estudo de Bireaud (2001), segundo o qual unidades habitacionais rurais não se diferenciam muito das unidades básicas de interesse social, onde os próprios proprietários dos terrenos são encarregados de construir sua casa, com subsídios do governo nacional e empréstimo do banco rural para terminar a obra. A mão de obra é realizada pela própria família em parceria com vizinhos, às vezes com assistência técnica do município ou contratada pelo proprietário. Os custos correspondem a 163 R\$/m<sup>2</sup> (valores em Reais em setembro de 2006), inferiores em 30 a 40% às unidades habitacionais em áreas urbanas. No Local 1 há 190m<sup>2</sup> construídos, equivalentes a duas casas, cujo custo é de R\$ 30.970; no Local 2 há 280m<sup>2</sup> construídos, correspondentes a quatro casas, cujo custo é de R\$ 45.640.

#### **8.7.1.2 Custo de unidades produtivas.**

A única unidade produtiva dos três locais encontra-se no Local 2, com 12.600m<sup>2</sup> do terreno destinados à produção de leite e laticínios. A análise desses custos foi feita à luz dos resultados obtidos por Holmann et al. (2003), a partir dos dados provenientes de 545 fazendas produtoras de leite em diferentes regiões da Colômbia. Um dos resultados da pesquisa foi a Tabela 35, onde se apresentam os custos comerciais da terra e as inversões de capital (terra, infra-estrutura e equipamentos).

**Tabela 35. Inversão de capital em terras, infraestrutura e equipamentos. (Holmann 2003 – modificados os valores para reais (R\$)).**

PARÂMETRO	REGIÃO DO ESTUDO
	Antioquia
Custo comercial da terra (R\$/m <sup>2</sup> )	0,79
Inversão total de capital (infra-estrutura, equipamento, gado) (R\$/m <sup>2</sup> )	1,18

Nota: 1US\$ = 2,17R\$ (set/2006)

O valor adotado é de 1,18 R\$/m<sup>2</sup>, que representam as inversões totais de capital e que são os custos pelos quais os proprietários realmente querem ser indenizados. Para o Local 2, com 12.600 m<sup>2</sup> de área disponível para produção de leite, o custo da unidade produtiva é de R\$14.868.

Na Tabela 36 estão apresentados os custos totais dos três locais.

**Tabela 36. Custo total dos terrenos (valores em reais (R\$), 2006).**

	Custo do terreno	Custo das unidades habitacionais	Custo das unidades produtivas	<b>Custo total do terreno (C<sub>Te</sub>)</b>
<b>Local 1</b>	40.000	30.970		<b>70.970</b>
<b>Local 2</b>	22.500	45.640	14.868	<b>83.008</b>
<b>Local 3</b>	48.000			<b>48.000</b>

### 8.7.2 Custos das escavações.

Os custos das escavações se dividem em dois tipos, dependendo dos materiais a escavar: as escavações em material comum e conglomerados e as escavações em rocha.

As escavações em material comum e conglomerados consistem num conjunto de atividades de escavar, remover, transportar e colocar nos locais indicados para sua posterior utilização e adequação nas obras de aterro; compreendem ademais os trabalhos de decapeamento (remoção da primeira capa vegetal), mão de obra e os equipamentos necessários para sua

execução. Englobam escavações em solos consolidados e de alta coesão, de textura granular a fina, como também a remoção de pedras menores do que  $0,75\text{m}^3$ .

As escavações em rocha compreendem toda a escavação de rocha de origem ígnea, metamórfica ou sedimentar de volume maior do que  $0,75\text{m}^3$  e em geral todo material que somente pode ser escavado mediante o uso de explosivos. Também incluem o conjunto de atividades de remoção, transporte e colocação nos sítios indicados para sua posterior utilização e adequação nas obras de aterro. Deve-se contemplar a mão de obra e os equipamentos necessários para a execução da obra.

Pelas condições geológicas observadas nos locais, estima-se que nos Locais 2 e 3 90% da escavação é em material de conglomerado e 10% em rocha, e no Local 1, 70% em material de conglomerado e 30% em rocha.

Os custos por  $\text{m}^3$  são tomados de orçamentos oficiais do ano 2006 da Secretaria de Planejamento da Colômbia (Oficina de Projetos ), convertidos em reais (R\$) e mostrados na Tabela 37.

**Tabela 37. Custos de escavação (convertidos em reais (R\$)).**

Descrição	Custo R\$/ $\text{m}^3$	Local 1	Local 2	Local 3
Escavação em material comum e conglomerado	14,68	842.632	1'466.532	3'950.388
Escavações em rocha	21,04	517.584	233.544	629.096
<b>Total custo escavações (<math>C_{es}</math>)</b>		<b>1.360.216</b>	<b>1.700.076</b>	<b>4.579.484</b>

### 8.7.3 Custos do aterro

Estes custos são relativos ao transporte, colocação em camadas e compactação à densidade específica do material do aterro. O material deve atender às especificações estabelecidas e de preferência se utiliza o material das escavações (95%). A construção do aterro inclui a mão de obra e equipamento. Os custos foram tomados da revista Construção (2006) e apresentados na Tabela 38.

**Tabela 38. Custos de terraplenagem (valores em reais (R\$)).**

Descrição	Custo R\$/m <sup>3</sup>	Local 1	Local 2	Local 3
<b>Custos do aterro</b> (C <sub>at</sub> )	23,79	<b>1.608.204</b>	<b>1.434.537</b>	<b>0</b>

#### 8.7.4 Custos totais

Os custos totais para cada local segundo a equação (21) estão resumidos na Tabela 39.

**Tabela 39. Custos totais**

	C <sub>Te</sub>	C <sub>es</sub>	C <sub>at</sub>	CT
Local 1	<b>70.970</b>	<b>1.360.216</b>	<b>1.608.204</b>	<b>3.039.390</b>
Local 2	<b>83.008</b>	<b>1.700.076</b>	<b>1.434.537</b>	<b>3.217.621</b>
Local 3	<b>48.000</b>	<b>4.579.484</b>	<b>0</b>	<b>4.627.484</b>

#### 8.8 Análise conjunta de custos totais e pesos resultantes da análise hierárquica.

Segundo Soares (2002), após sintetizar as prioridades, o método de análise hierárquica apresenta um vetor único de valores normalizados que representa a classificação das alternativas. O autor recomenda que o mesmo seja feito com os valores obtidos para os aspectos econômicos, de modo a viabilizar a interação entre os fatores de classificação das alternativas e os custos totais. Essa etapa é realizada considerando qual é a proporção de aspecto econômico total associado a um local, segundo a equação (22)

$$\sigma_i = \frac{C_i}{\sum_{m=1}^n C_m} \quad (22)$$

Onde  $\sigma_i$  = coeficiente de aspecto econômico da alternativa  $i$

$C_i$  = aspecto econômico de  $i$

$n$  = número de alternativas existentes no processo.

Para o estudo de caso, os coeficientes de aspecto econômico dos três locais estão apresentados na Tabela 40

**Tabela 40. Coeficientes de aspecto econômico.**

Local	$\sigma_i$ .
<b>LOCAL 1</b>	<b>0,279</b>
<b>LOCAL 2</b>	<b>0,296</b>
<b>LOCAL 3</b>	<b>0,425</b>

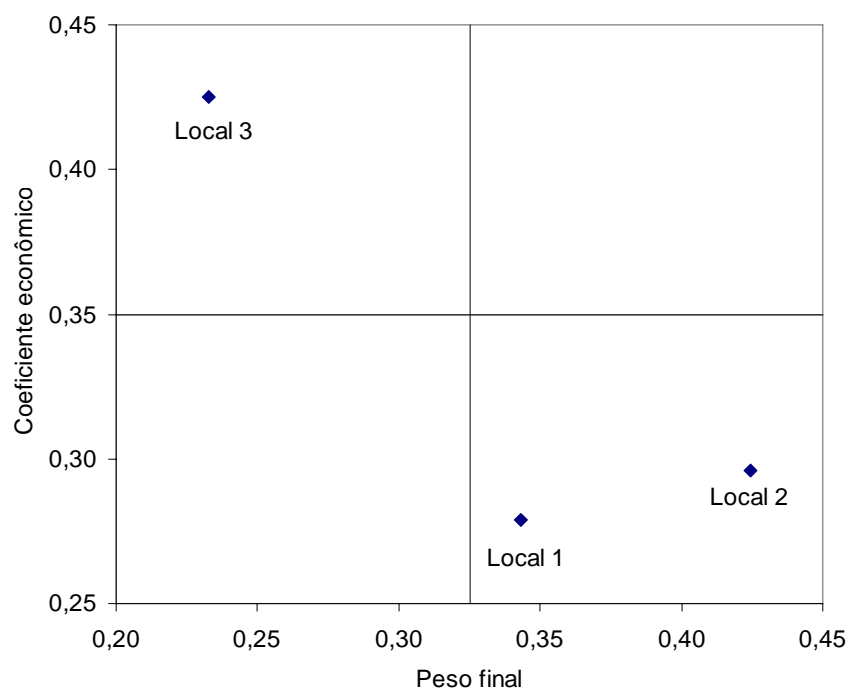
Após a aplicação do modelo de decisão e obtenção do coeficiente de aspecto econômico das alternativas, atribui-se a cada local um par ordenado numa matriz de classificação, que associa o valor porcentual do custo total ao peso final, conforme esquematizado na Figura 39. Soares (2002) sugere que a escala seja definida de modo que seus pontos extremos coincidam sempre com o valor mínimo e o valor máximo observados nas alternativas, em ambos eixos.

**Figura 39. Representação das variáveis coeficiente de aspecto econômico e peso do local (Soares 2002, modificado).**

Observando a Figura 39, o tomador de decisões busca identificar locais cujo par ordenado fique no quadrante IV. Se nenhuma alternativa se encontra nesse quadrante, se considerarão os quadrantes II e III. Se duas alternativas estiverem no mesmo quadrante, o critério de desempate será o de menor custo.

A Figura 40 mostra a análise conjunta de custos totais e pesos resultantes da análise hierárquica para o estudo de caso. Observa-se que os Locais 1 e 2 se encontram no quadrante IV, sendo que o Local 1 apresenta o menor custo total. Esta seria uma possível decisão para o

problema proposto. Porém, a maior vantagem da matriz apresentada na Figura é a possibilidade de visualizar a situação de cada local, estando a decisão sujeita a negociações ou planejamento estratégico.



**Figura 40. Análise conjunta de custos totais e pesos resultantes.**

## 9 CONCLUSÕES

Uma contribuição importante da pesquisa foi a concepção da lista de atributos apresentada na Tabela 17, que pode servir como um bom começo nas atividades de seleção de locais para barragens de rejeitos, orientando a coleta de dados necessária para posterior utilização em qualquer método racional de tomada de decisões. Procurou-se elaborar uma lista de atributos abrangente e consistente, que se pode modificar segundo as necessidades dos tomadores de decisão.

Na seleção de alternativas de localização de barragens de rejeito, a geoquímica e a geologia jogam um papel muito importante na eliminação de áreas impróprias. Os trabalhos de prospecção nas empresas mineradoras são registrados historicamente e podem ser sistematizados em “softwares”. Recomenda-se fortemente a utilização dessas informações regionais antes da definição das alternativas de local e coleta de dados correspondentes.

O método de análise hierárquica (AHP) permite considerar muitos atributos e suas interações, é de fácil execução, minimiza a subjetividade, organiza o trabalho melhorando sua visualização e fornece uma ordenação por pesos globais.

Um das conclusões mais importantes desta pesquisa é que a experiência joga um papel importantíssimo na tomada de decisões. A utilização do método de análise hierárquica não se limita a definir o problema (no caso, escolher a melhor alternativa para localizar uma barragem de rejeitos) e aplicar a metodologia; é necessário envolver-se com o problema, obtendo informações a partir da bibliografia, visitas ao campo, diversas fontes, consultas a especialistas, e finalmente, realizar uma revisão crítica com base na experiência própria do tomador de decisão.

Grande parte da dificuldade na utilização do método de análise hierárquica não está na fase de avaliação, isto é, no preenchimento e cálculo das matrizes, mas sim na fase da definição e estruturação dos critérios e sub-critérios, ou seja, na elaboração da hierarquia. Comparem-se as tabelas de indicadores elaboradas por vários profissionais (Tabela 13, inclusive a Tabela 17), e a hierarquia resultante (Figura 37): a partir de conhecimento técnico pré-existente, é necessário elaborar o problema do ponto de vista dos objetivos, trabalhando-o de acordo com

aspectos fundamentais, os quais podem ser compreendidos por todos os atores envolvidos, inclusive os leigos na área de engenharia de barragens.

A aplicação manual do AHP, por meio de planilhas EXCEL, em vez da utilização de “softwares” disponíveis, permitiu um maior controle e compreensão das etapas metodológicas.

No caso de alternativas de pesos finais semelhantes, o AHP, quando trabalhado com a sua variante multiplicativa, permite confirmar quais alternativas têm maior peso sob as outras, evitando o problema de reversão.

As análises de sensibilidade permitem ao tomador de decisões modificar os julgamentos paritários dos critérios e sub-critérios, encontrando novos elementos de decisão, como visto no item 8.6, onde com mínimas alterações nos julgamentos as decisões se modificam drasticamente. É importante ressaltar que as análises de sensibilidade não são feitas modificando os julgamentos paritários sem critério, “jogando números”; é preciso conhecer em profundidade o problema e desejar conhecer a influência de um determinado critério ou sub-critério.

A análise conjunta de custos totais e pesos resultantes da hierarquia permitiu observar globalmente o problema; assim, o tomador de decisão tem a possibilidade de escolher a melhor proposta dependendo de seus objetivos estratégicos e de planejamento.

Como sugestão para prosseguimento da pesquisa, propõe-se a realização de novos estudos focados no uso da análise conjunta para avaliar diferentes aspectos relacionados à vida útil de uma barragem de rejeitos, por exemplo, custo-risco ou custo-segurança estrutural da obra, em diferentes pacotes hierárquicos, e assim obter melhores decisões quando se tenha selecionado o local de obra.

Também seria interessante repetir a análise de sensibilidade para outros sub-critérios, inclusive com a agregação de critérios, sub-critérios e alternativas.

## REFERENCIAS.

ARANGO, J. C. **Escogencia de blancos para exploración regional de acuerdo al análisis y procesamiento sistematizado de información e imágenes de sensores remotos en la región del Carmen de Atrato (Chocó)**. Medellín, Ant.: MINER S.A., 2003.

ARNEZ, F. I. V. **Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos**. 1999. 83 f+ anexo. (Dissertação) Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ASSIS, A; ESPÓSITO, T. Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - REGEO'95, 3., Ouro Preto, MG. **Anais...** Ouro Preto, MG: ABMS/ABGE/CBGB, 1995. p. 259-273. v.1.

BIREAUD, J. M.; BRILL, I. U. **Colombia el remanso de comfandi-fundacion carvajal: estudio BID vivienda: problemática y oportunidades para la provision integrada de terrenos equipados y credito para la vivienda progresiva..** Colombia: ACT Consultants, 2001. 57 p.

BRAWNER, C. O.; CAMPBELL, D. B. The tailings structure and its characteristics: a soil engineer's viewpoint: tailings disposal today, In: INTERNATIONAL TAILING SYMPOSIUM, 1., 1973, Tucson, Arizona. **Proceedings...** Tucson, Arizona: Miller Freeman Publications, 1973. p. 59-101.

BURKE, H. H. Structural characteristics resulting from construction methods: tailing disposal today. In: INTERNATIONAL TAILING SYMPOSIUM, 1., Tucson, Arizona, 1973. **Proceedings...** Tucson, Arizona: Miller Freeman Publications, 1973. p. 211-223.

CALDWELL, J. A.; ROBERTSON, A. M. Selection of tailings impoundment sites. **Die Siveleingenieur in Suid Africa**, Sul da África, p. 537-553, oct. 1983. Disponível em: <<http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/tailings.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2005.

CARVALHO, C. S. **Gerenciamento de riscos geotécnicos em encostas urbanas: uma proposta baseada na análise de decisão**. 1996. 192 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARVALHO, M. M. **QFD: uma ferramenta de tomada de decisão em projeto**. 1997. 162 f. + anexos. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

CONSTRUÇÃO MERCADO. São Paulo: Pini, n.59, jun. 2006.

ENOKI, C. H. **Gestão de processos de negócio**: uma contribuição par avaliação de soluções de Business Process Management (BPM) sob a ótica da estratégia de operações. 2006. 202 f. + anexos. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ESPÓSITO, T. D. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

FARIA, C. E. G. **A mineração e o meio ambiente no Brasil**. [S.l.]: CGEE, 2002. 41 p. Disponível em: <[http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011\\_02.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2005.

FIGUEREDO, A. D. S. **Metodologia para o planejamento do transporte urbano**: um enfoque para o processo empresarial do serviço por ônibus. 1999. 186 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

GALVES, M. L. **Condicionantes geotécnicos do traçado de rodovias**: uma proposta metodológica de escolha baseada na análise de decisões com objetivos múltiplos. 1995. 235 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

GARBER, M. F. **Estruturas flutuantes para exploração de campos de petróleo no mar (FPSO)**: Apoio à decisão na escolha do sistema. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GONÇALVES, P. G. **Contribuição ao estudo de conflitos na implantação do ferroanel na região metropolitana de São Paulo**. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HOLMANN, F. et al. **Evolución de los sistemas de produccion de leche en el tropico latinoamericano y su interrelacion con los mercados**: un analisis del caso Colombiano. Colombia, 55 p. Disponível em: <<http://grupochorlavi.org/php/doc/documentos/evolucionsistemas.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2006.

IAÑEZ, M. M. **Uma contribuição ao processo decisório de terceirização das atividades logísticas**. 2002. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

INTERNATIONAL COUSIN ON METALS AND THE ENVIRONMENTAL. United Nations Environment Programme. **Case studies on tailings management**. Ottawa, Ontario, Canada: ICME; Paris: UNEP, nov. 1998, 66 p. Disponível em: <<http://www.natural-resources.org/minerals/cd/docs/unep/tailingscasestudies.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2004.

JOHNSTON, C. Tailing disposal – its hidden costs: tailings disposal today, In: INTERNATIONAL TAILING SYMPOSIUM, 1., 1973, Tucson, Arizona. **Proceedings...** Tucson, Arizona: Miller Freeman Publications, 1973. p. 763–815.

LA ASOCIACION DE MINERA DE CANADA **Guía para la administración de instalaciones de relaves**. Ottawa, Ontário, Canadá, 1998. 58 p. Disponível em: <[http://www.mining.ca/www/media\\_lib/MAC\\_Documents/Publications/FrenchSpanish/Guides p.pdf](http://www.mining.ca/www/media_lib/MAC_Documents/Publications/FrenchSpanish/Guides p.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2005.

LIPORACI, S. R.; ZUQUETTE, L. V. Carta de zoneamento geotécnico geral utilizada para indicar áreas favoráveis à disposição de rejeitos. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - REGEO'95, 3., Ouro Preto, MG. **Anais...** Ouro Preto, MG: ABMS/ABGE/CBGB, 1995. p 135-147. v.1.

LISBOA, M. V. **Contribuição para tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MARQUES, N. G. **Seleção de áreas para aterros sanitários baseada em mapeamento geotécnico e analytic hierarchy process – AHP**. 2002. 163 f + anexos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

McPHAIL, G. Implications of diferent tailings disposal options on future rehabilitation. In: MINE TAILINGS 2006, 2006, Brisbane, Queensland.[**Trabalhos apresentados**]. Brisbane, Queensland: [s.n.], 2006. 16 p. Disponível em: <<http://www.infomine.com/publications/docs/McPhail2006.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2005.

MELLO, F. M. Segurança de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 14., 1981, Recife, PE. **Anais...** Recife, PE: CBGB, 1981. p 343. v. 4.

MELLO, V. F. B. de. Diferenças sérias entre barragens de acumulação de água e de rejeitos. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, dez. 1987, Rio de Janeiro. **Barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração: anais**. Rio de Janeiro : Abms/abge/cbgb/dtg-Ce, 1987. p. 1-43, v.2.

MOARES, W. N. **Análise de investimentos em empresas de internet**: estudo de casos múltiplos usando o AHP - Analytic Hierarchy Process. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MORENO JIMENEZ, J. M.; ESCOBAR URMELETA, M. T. El pesar en el proceso analítico jerárquico 1. **Estudios de Economía Aplicada**, Madrid, España, v. 14, p. 95-115, 2000. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/301/30114105.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2005.

MORITA, H. **Revisão do método de análise hierárquica – MAH (AHP - Analytic Hierarchy Process)**. 1998. 129 f. + apêndice. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

NAKAHARA, H. et al. Selection of MSW landfill site by means of the analytic hierarchy process. In: INT. CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS - ICEG, 4., 2002, Lisse. **Proceedings...** Lisse: Swets & Zeitlinger, 2002, v. 1, p. 407-412.

NIEBLE, C. M. **Deposição de rejeitos**: curso de geotécnica aplicada à minas à céu aberto. Itabira, MG: Abib Engenharia S.A., 1986. 28p. il. Apostila.

NIEBLE, C. M; ROCHA, R. dos S. Método construtivo usa rejeitos para construir barragem de deposição. **Construção Pesada**, São Paulo, v. 6, n. 70, p 90-96, 1976.

NITTETSU MINING CO. LTD). **Informes internos**. Medellín: Miner S.A, 1991. Apostila.

NUNES DA SILVA, A. **Geoprocessamento e sensoriamento remoto como apoio ao planejamento territorial do município de Ipiranga-SP**. 2002. 200 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo 2002.

ORTIZ, B. F. **El Roble, un ejemplo colombiano de un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénicos**. 1988. 55 f. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para la promoción a Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, Colombia, 1988.

POMERANZ, L. **Avaliação de projetos públicos**: metodologia alternativa. São Paulo: IPE/USP, c1991. 141 p. (Relatório de pesquisas; RP-48).

QUINTERO, C. Y. Valorización de la tierra rural en Colombia. **Civilizar, revista electronica de difusion científica**. Bogotá, Colombia: Universidad Santiago Arboleda, v. 10,. jun. 2006. Disponible em: <<http://www.usergioarboleda.edu.co/civilizar/>>. Acesso em: 11 set. 2006.

RIBEIRO, L. F. M. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos**. 2000. 297 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

RITCEY, G. M. Problems and solutions in the mining industry. **Tailings Management**: Elsevier Science Publishers, 1989.

ROBERTSON, A. M. Site selection and design options for uranium mine waste and plant tailings. In: COUNCIL OF MINING AND METALLURGICAL INSTITUTIONS - CMMI CONGRESS, 12., 1982, Johannesburg, South Africa. **Proceedings...** Johannesburg, South Africa: Institution of Mining and Metallurgy, 1982. p. 861-886. Disponível em: <[http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/mine\\_waste.pdf](http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/mine_waste.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2005.

ROBERTSON, A. M.; MOSS, A. S. Site selection and optimization studies for mill sites and tailings impoundments. **Asian Mining**, Canada, p.301-311, 1981. Disponível em: <[http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/mill\\_site.pdf](http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/mill_site.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2005.

ROBERTSON, A. M.; SHAW, S. C. Use of the multiple accounts analysis process for sustainability optimization. In: SME ANNUAL MEETING, 2004, Denver, Colorado. **Proceedings...** Denver, Colorado: [s.n.], 2004. 8 p. Disponível em: <[http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/MAA\\_SME\\_2004.pdf](http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/MAA_SME_2004.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2005.

ROBERTSON, A. M.; SHEPHERD, T.; VAN ZYL, D. Uranium tailings impoundment site selection. In: SYMPOSIUM ON URANIUM MILL TAILINGS MANAGEMENT, 1980, Fort Collins, Colorado. [**Trabalhos apresentados**]. Fort Collins, Colorado: [s.n.], nov. 1980. Disponível em: <<http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/tailings.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2005.

ROBERTSON, A. M.; SHAW, S. C. A multiple account analysis for tailings site selection, In: SUDBURY '99 CONFERENCE MINING AND THE ENVIRONMENT, 2., 1999, Sudbury, Ont., Canada. **Proceedings...**, Sudbury, Ont., Canada: Centre in Mining and Mineral Exploration Research, Laurentian University, 1999. p. 883-891. v. 3. Disponível em: <<http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/ssanalysis.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2005.

ROSENBLOOM, E. S. A probabilistic interpretation of the final rankings in AHP. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 96, p. 371-378, 1996.  
SAATY, T. Basic theory of the analytic hierarchy process: how to make a decision. **Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales**, España, v. 93, n. 4, p. 395-423, 1999.

SAATY, T. **Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process**. Pittsburgh, Pa.: RWS Publications, 2000.

SAATY, T. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hil, 1980. 287 p.

SANCHEZ, L. E. Manejo de residuos sólidos en minería. In: CURSO INTERNACIONAL DE ASPECTOS GEOLÓGICOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL, 2., 2000, Campinas. **Notas de clases Montevideo**. Montevideo: UNESCO, 2002. p 249-250.

SCHOLL, A. et al. Solving multiattribute design problems with analytic hierarchy process and conjoint analysis: An empirical comparison. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 164, p. 760-777, 2004.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVEIRA, E.B.S.; READES, D.W. Barragens para contenção de rejeitos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 9, 1973, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SNGB, 1973. 35 p. Tema 2.

SOARES, L. **Barragens de contenção de rejeitos: metodologia de implantação, operação e manutenção**. São Paulo: EPUSP-IM, 1998. 74 p. Apostilla de Aula.

SOARES, M. G. **Classificação de operadores terceirizados, visando o estabelecimento de parcerias de negocio no contexto logístico empresarial**. 2002. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 2002.

TRIANANTAPHYLLOU, E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP. **Journal of Multi-criteria decision analysis**. New Jersey, USA, v. 10, p. 11-25, 2001.

VICK, S. G. **Planning, design and analysis of tailing dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 369 p.

VICK, S. G. Siting and desing of tailings impoundments. **Mining Engineering**, New York, v. 33, n. 6, p. 653-657, 1981.

ZAHIR, A. S. Incorporating the uncertainty of decision judgments in the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, Amsterdam, v. 53, p. 206–216, 1991.

ZUFFO, A. C. **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos.** 1998. 301 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 190 p.



MEDIOS	125.0	121.1	137.0	203.7	266.3	236.2	249.7	200.6	218.1	251.6	223.7	141.3	2374.3
MAXIMOS	255.0	253.0	290.0	334.0	365.0	460.0	646.0	359.0	405.0	432.0	619.0	249.0	646.0
MINIMOS	0.0	30.0	38.0	86.0	146.0	106.0	84.0	51.0	128.0	152.0	108.7	20.0	0.0

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SISTEMA DE INFORMACION  
NACIONAL AMBIENTAL

VALORES MAXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)  
EN 24 HORAS

FECHA DE PROCESO : 2001/08/23

ESTACION : 1102001 CARMEN DE ATRATO

LATITUD 0554 N TIPO EST PM DEPTO CHOCO FECHA-INSTALACION 1958-OCT  
LONGITUD 7612 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO EL CARMEN FECHA-SUSPENSION  
ELEVACION 1850 m.s.n.m REGIONAL 01 ANTIOQUIA CORRIENTE ATRATO

\*\*\*\*\*  
A#O EST ENT ENERO \* FEBRE \* MARZO \* ABRIL \* MAYO \* JUNIO \* JULIO \* AGOST \* SEPTI \* OCTUB \* NOVIE \* DICIE \* VR ANUAL \*  
\*\*\*\*\*

1980	2	01	38.0	33.0	30.0	45.0	75.0	45.0	32.0	53.0	34.0	28.0	15.0	40.0	75.0
1981	2	01	15.0	28.0	40.0	50.0	51.0	70.0	23.0	46.0	40.0	40.0	15.0	34.0	70.0
1982	2	01	35.0	34.0	30.0	45.0	30.0	50.0	50.0	37.0	41.0			23.0 3	50.0 3
1983	2	01	2.0	12.0	20.0	32.0	26.0	27.0	53.0	47.0	61.0	40.0	26.0	22.0	61.0
1984	2	01	45.0	30.0	24.0	34.0	28.0	25.8	34.0	29.0	66.0	39.0	60.0	33.0	66.0
1985	2	01	28.0	15.0	32.0	23.0	32.0	30.0	24.0	34.0	29.0	26.0	25.0	20.0	34.0
1986	2	01		35.0	34.0	65.0	65.0	70.0	55.0	27.0	35.0	40.0	36.0	14.0	70.0 3
1987	2	01	25.0	27.0	34.0	23.0	27.0	35.0	40.0	35.0	29.0	33.0	37.0	20.0	40.0
1988	1	01	20.0	60.0	16.0	17.0	30.0	40.0	35.0	40.0	35.0	64.0	50.0	31.0	64.0
1989	2	01	20.0	25.0	20.0	44.0	30.0	26.0	20.0	44.0	36.0	37.0	25.0	30.0	44.0
1990	1	01	21.0	50.0	17.0					20.0	24.0 3	40.0	30.0	15.0	50.0 3
1991	1	01	10.0	55.0	33.0	18.0	40.0	18.0	32.0	20.0	34.0	45.0	58.0	31.0	58.0
1992	1	01	6.0	16.0	42.0	20.0	60.0	32.0	20.0	25.0	20.0	23.0	30.0	16.0	60.0
1993	1	01	58.0	17.0	39.0	74.0	39.0	50.0	50.0	20.0	29.0	30.0	50.0	47.0 3	74.0 3
1994	1	01	22.0	70.0	30.0	25.0	37.0	34.0	20.0	35.0	34.0	57.0	60.0	23.0	70.0
1995	1	01	.0	31.0	17.0	30.0	35.0	78.0	90.0	70.0	25.0	35.0 3	27.0	32.0	90.0 3
1996	1	01	17.0	31.0	37.0	53.0	45.0	60.0	70.0	28.0	66.0	38.0	31.0	36.0	70.0
1997	1	01	27.0	50.0	45.0	33.0	55.0	20.0	34.0	17.0	24.0	43.0	38.0	8.0	55.0
1998	1	01	15.0	16.0	33.0	26.0	45.0	41.0	28.0	36.0	23.0	27.0	30.0	26.0	45.0
1999	1	01	38.0	53.0	30.0	34.0	27.0	35.0	25.0	35.0	36.0	19.0	78.0	40.0	78.0
2000	1	01	50.0	31.0	17.0	27.0	40.0	33.0							50.0 3

MEDIOS 24.6 34.2 29.5 35.9 40.9 41.0 38.7 34.9 36.1 37.1 37.9 27.1 34.8  
MAXIMOS 58.0 70.0 45.0 74.0 75.0 78.0 90.0 70.0 66.0 64.0 78.0 47.0 90.0  
MINIMOS 0.0 12.0 16.0 17.0 26.0 18.0 20.0 17.0 20.0 19.0 15.0 8.0 0.0

\*\*\*\*\*

\*\* C O N V E N C I O N E S \*\*

EST = ESTADO DE LA INFORMACION

1 : Preliminares Ideam  
2 : Definitivos Ideam  
3 : Preliminares Otra Entidad  
4 : Definitivos Otra Entidad

\*\* AUSENCIAS DE DATO \*\*

1 : Ausencia del observ  
2 : Desperfecto instru.  
3 : Ausencia instrument  
4 : Dato rechazado  
6 : Nivel superior  
7 : Nivel inferior  
8 : Curva de gastos  
9 : Seccion inestable  
A : Instr. sedimentado  
M : Maximo no extrapol.  
\* : Datos insuficientes

\*\* ORIGENES DE DATO \*\*

1 : Registrados  
3 : Incompletos  
4 : Dudosos  
6 : Est. Regresion  
7 : Est. Interpolacion  
8 : Est. Otros metodos  
9 : Generados (Series)

**Anexo 2. Localização e conteúdo de elementos exploradores em sedimentos ativos.**

COORDENADAS Este-Norte		Ppm CHUMBO	Ppm ZINCO	Ppm OURO	Ppm PRATA				
1102482.3469647	1149849.0116386	21.9	"Pb"	128.3	"Zn"	0	"Au"	0.32	"Ag"
1102762.7635255	1149710.0129318	0	"Pb"	135.6	"Zn"	"nd"	"Au"	0.3	"Ag"
1102809.0932182	1149339.3497137	58.2	"Pb"	155.1	"Zn"	0	"Au"	1.03	"Ag"
1102974.9047498	1149212.5438759	50.3	"Pb"	117.6	"Zn"	0	"Au"	1.55	"Ag"
1103126.0858522	1149124.7552189	20.7	"Pb"	116.3	"Zn"	0	"Au"	0.63	"Ag"
1103584.505969	1149171.0881212	0	"Pb"	0	"Zn"	"nd"	"Au"	0	"Ag"
1103555.2451105	1149249.1224829	0	"Pb"	0	"Zn"	18.3	"Au"	0	"Ag"
1103547.9298959	1149293.0168114	0	"Pb"	116.8	"Zn"	"nd"	"Au"	0.2	"Ag"
1103674.7269495	1149814.8716054	0	"Pb"	316.9	"Zn"	"nd"	"Au"	1.1	"Ag"
1104910.998222	1149712.4515056	0	"Pb"	110.7	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1104847.5996952	1149353.9811565	0	"Pb"	158.7	"Zn"	0	"Au"	0.6	"Ag"
1104852.476505	1149266.1924995	13.3	"Pb"	163.5	"Zn"	0.123	"Au"	0.36	"Ag"
1104901.2446025	1149224.7367449	11.7	"Pb"	110.4	"Zn"	0.106	"Au"	0.16	"Ag"
1104998.7807976	1149188.1581378	0	"Pb"	87	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106425.2476505	1149807.555884	10	"Pb"	72	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1106500.8382017	1149846.5730648	16	"Pb"	101	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1103633.2740665	1148324.9030113	14.1	"Pb"	130	"Zn"	0	"Au"	0.33	"Ag"
1103747.8790958	1148561.4446702	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1103803.9624079	1148505.3574728	10.6	"Pb"	148.5	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1103838.1000762	1148517.5503418	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1103894.1833884	1148110.3085165	19.3	"Pb"	139.2	"Zn"	0	"Au"	0.39	"Ag"
1104079.502159	1148646.7947534	9.8	"Pb"	97.1	"Zn"	0	"Au"	0.21	"Ag"
1104347.7266955	1148905.2835766	16.1	"Pb"	182.7	"Zn"	0	"Au"	0.57	"Ag"
1104376.987554	1148712.6362461	13.8	"Pb"	137.7	"Zn"	0.445	"Au"	0.5	"Ag"
1104779.3243586	1148307.8329946	0	"Pb"	102.8	"Zn"	0.28	"Au"	nd	"Ag"
1104650.0889002	1148005.449843	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1105123.1394463	1148083.4842047	0	"Pb"	91.4	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107039.7256795	1148305.3944208	7.8	"Pb"	56.7	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107022.6568453	1147995.6955478	10.1	"Pb"	77.5	"Zn"	0.11	"Au"	0.15	"Ag"
1107032.4104648	1147339.7191945	8.1	"Pb"	71.4	"Zn"	0.07	"Au"	0.15	"Ag"

1107115.3162306	1147042.2131905	9.2	"Pb"	89.6	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1107010.4648209	1147300.7020137	10.9	"Pb"	96.8	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1106591.0591821	1147256.8076852	8.6	"Pb"	52.5	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1106537.4142748	1147315.3334565	10.6	"Pb"	102	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1106105.8166116	1147451.8935895	10.1	"Pb"	118.5	"Zn"	"nd"	"Au"	0.15	"Ag"
1105942.4434849	1147805.4867911	12.4	"Pb"	104	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1105920.497841	1147768.908184	12.4	"Pb"	112.6	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1105198.7299975	1147888.3983004	0	"Pb"	106.5	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1105052.4257049	1147942.0469241	0	"Pb"	109.2	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1104891.490983	1147781.101053	12.2	"Pb"	115.2	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1104862.2301245	1147773.7853316	38.7	"Pb"	294.5	"Zn"	5.164	"Au"	1.41	"Ag"
1104806.1468123	1147754.2767412	68.7	"Pb"	137.3	"Zn"	0.072	"Au"	2.08	"Ag"
1104762.2555245	1147725.0138555	13.8	"Pb"	132.4	"Zn"	0	"Au"	0.26	"Ag"
1104706.1722123	1147720.1367079	10.1	"Pb"	72.2	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1104486.7157734	1147749.3995936	41.8	"Pb"	167.5	"Zn"	0.459	"Au"	1.23	"Ag"
1104501.3462027	1147707.9438389	19.9	"Pb"	128.2	"Zn"	1.075	"Au"	0.39	"Ag"
1104213.6144272	1147507.980787	0	"Pb"	0	"Zn"	1.1	"Au"	0	"Ag"
1104179.476759	1147473.8407537	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1104157.5311151	1147434.8235729	0	"Pb"	97.1	"Zn"	0.35	"Au"	0.2	"Ag"
1103974.6507493	1147942.0469241	17.2	"Pb"	130.6	"Zn"	0	"Au"	0.43	"Ag"
1103860.0457201	1147881.082579	15.2	"Pb"	131.4	"Zn"	0	"Au"	0.22	"Ag"
1103426.009652	1147693.3123961	15.9	"Pb"	140.2	"Zn"	0	"Au"	0.42	"Ag"
1103218.7452375	1147749.3995936	14	"Pb"	110	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1103204.1148082	1147710.3824127	13.1	"Pb"	125.8	"Zn"	0	"Au"	0.28	"Ag"
1103152.9083058	1147705.5052651	15.1	"Pb"	141.1	"Zn"	0.05	"Au"	0.4	"Ag"
1102809.0932182	1147907.9068908	13.4	"Pb"	131	"Zn"	0.05	"Au"	0.18	"Ag"
1102762.7635255	1147898.1525956	17.6	"Pb"	128.5	"Zn"	0	"Au"	0.36	"Ag"
1102760.3251207	1147849.3811195	14	"Pb"	121.3	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1104250.1905004	1147093.4232403	15	"Pb"	185.7	"Zn"	10.12	"Au"	0.91	"Ag"
1104698.8569977	1147039.7746167	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1104889.0525781	1147195.8433401	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1105010.9728219	1147225.1062258	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1105037.7952756	1147215.3519305	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1105154.8387097	1147193.4047663	5.9	"Pb"	50.9	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1103830.7848616	1146000.9421762	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"

1103918.5674371	1146252.115278	15.4	"Pb"	104.5	"Zn"	0	"Au"	0.96	"Ag"
1103762.509525	1146356.9739516	11.8	"Pb"	104.7	"Zn"	0	"Au"	0.18	"Ag"
1103743.002286	1146647.1642343	38	"Pb"	132.7	"Zn"	0	"Au"	1.13	"Ag"
1103777.1399543	1146683.7428413	18.6	"Pb"	140.8	"Zn"	0	"Au"	0.62	"Ag"
1105279.1973584	1146278.9395899	0	"Pb"	100.1	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105815.6464313	1146637.409939	0	"Pb"	19.9	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1105810.7696215	1146773.970072	0	"Pb"	22.8	"Zn"	0	"Au"	1.2	"Ag"
1105849.7840996	1146820.3029743	0	"Pb"	63.2	"Zn"	0	"Au"	1.6	"Ag"
1105881.483363	1146693.4971365	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1106113.1318263	1146844.6887124	0	"Pb"	39.1	"Zn"	0	"Au"	0.4	"Ag"
1106305.7658115	1146600.831332	0	"Pb"	190.2	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106347.2186944	1146530.1126917	0	"Pb"	121	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107205.5372111	1146766.6543506	11.4	"Pb"	92.8	"Zn"	0.109	"Au"	0.15	"Ag"
1107246.990094	1146598.3927582	11	"Pb"	119	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1107693.2181864	1146527.6741179	62	"Pb"	105	"Zn"	0	"Au"	2	"Ag"
1107766.3703327	1146442.3240347	14	"Pb"	92	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1107710.2870206	1146381.3596896	11.4	"Pb"	74.1	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1107546.9138938	1146061.9065213	8.4	"Pb"	76.8	"Zn"	0.18	"Au"	0.15	"Ag"
1102467.7165354	1146049.7136523	13.4	"Pb"	112.7	"Zn"	0.05	"Au"	0.26	"Ag"
1102016.6116332	1145610.7703676	10.5	"Pb"	105.2	"Zn"	0.05	"Au"	0.16	"Ag"
1102050.7493015	1145464.4559394	8.6	"Pb"	74.5	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1102499.4157988	1145493.7188251	10.3	"Pb"	105.4	"Zn"	0.05	"Au"	0.18	"Ag"
1103572.3139446	1145925.3463883	29.9	"Pb"	131.9	"Zn"	0	"Au"	0.95	"Ag"
1103582.0675641	1145105.9855902	8.2	"Pb"	75.1	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1104350.1651003	1145837.5577314	18.1	"Pb"	124.6	"Zn"	0	"Au"	0.45	"Ag"
1104379.4259589	1145881.4520599	23.3	"Pb"	169.2	"Zn"	0	"Au"	6.18	"Ag"
1104654.9657099	1145978.995012	0	"Pb"	134.3	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1104798.8315977	1145888.7677813	0	"Pb"	164.8	"Zn"	"nd"	"Au"	0.3	"Ag"
1104811.023622	1145930.2235359	0	"Pb"	107.3	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1106542.2910846	1145981.4335858	0	"Pb"	171.4	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107471.3233426	1145978.995012	12.2	"Pb"	94.5	"Zn"	0.15	"Au"	0.15	"Ag"
1107503.022606	1145727.8219102	17.6	"Pb"	31.3	"Zn"	0.15	"Au"	0.19	"Ag"
1107585.9283719	1145215.7214114	10.8	"Pb"	88.5	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1107561.5443231	1145115.7398855	7.7	"Pb"	87	"Zn"	0.27	"Au"	0.15	"Ag"
1107295.7581915	1145637.5946795	11.4	"Pb"	102.1	"Zn"	0.08	"Au"	0.15	"Ag"

1107229.9212598	1145561.9988916	8.5	"Pb"	113.5	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1106652.019304	1145537.6131535	0	"Pb"	189.5	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106681.2801626	1145335.2115278	0	"Pb"	242	"Zn"	0	"Au"	1.1	"Ag"
1107898.0441961	1145020.6355071	14.7	"Pb"	111.8	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107973.6347473	1144845.0581932	12.7	"Pb"	128.7	"Zn"	0.05	"Au"	0.24	"Ag"
1107927.3050546	1144667.0423056	15.9	"Pb"	50.6	"Zn"	0	"Au"	0.67	"Ag"
1107983.3883668	1144552.4293368	15	"Pb"	48.3	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1108058.978918	1144432.9392204	10.5	"Pb"	63.3	"Zn"	0.19	"Au"	0.15	"Ag"
1108144.3230886	1144342.7119897	9.3	"Pb"	44.5	"Zn"	18.39	"Au"	0.15	"Ag"
1108205.2832106	1144250.0461851	8.3	"Pb"	117.4	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1108107.7470155	1144306.1333826	8.7	"Pb"	79	"Zn"	0.11	"Au"	0.15	"Ag"
1108034.5948692	1144062.2760022	12.1	"Pb"	99	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1107729.7942596	1144710.936634	8.2	"Pb"	106	"Zn"	0.10	"Au"	0.15	"Ag"
1107566.4211328	1144201.274709	10.8	"Pb"	76.8	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1106922.6822454	1144671.9194532	0	"Pb"	166.3	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1106971.4503429	1144464.6406798	0	"Pb"	114.5	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106571.5519431	1144298.8176612	0	"Pb"	132.1	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105669.3421387	1144062.2760022	0	"Pb"	118.8	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1104181.9151638	1144596.3236653	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1104835.4076708	1144715.8137816	12	"Pb"	106	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1104820.7772416	1144669.4808794	0	"Pb"	125.2	"Zn"	"nd"	"Au"	0.3	"Ag"
1104879.2989586	1144679.2351746	0	"Pb"	147	"Zn"	"nd"	"Au"	0.5	"Ag"
1104930.505461	1144547.5521892	14	"Pb"	108	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1104959.7663195	1144554.8679106	14	"Pb"	116	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1105086.5633731	1144740.1995197	0	"Pb"	92	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1105086.5633731	1144710.936634	0	"Pb"	110.3	"Zn"	"nd"	"Au"	1	"Ag"
1105110.9474219	1144686.550896	14	"Pb"	100	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1105115.8242316	1144757.2695363	16	"Pb"	78	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1107488.3921768	1143984.2416405	7.5	"Pb"	68.3	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107966.3195326	1143423.3696656	86.9	"Pb"	147.8	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107849.2760986	1143225.8451875	11.6	"Pb"	84.7	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107802.9464059	1143267.3009422	7.8	"Pb"	79.9	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107656.6421133	1143735.5071125	11	"Pb"	41.1	"Zn"	0.07	"Au"	0.15	"Ag"
1107512.7762256	1143525.7897654	9.7	"Pb"	133.9	"Zn"	0.05	"Au"	0.16	"Ag"
1106969.011938	1143596.5084057	0	"Pb"	134.8	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"

1106976.3271527	1143645.2798818	0	"Pb"	167.6	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105523.0378461	1143142.9336782	11.3	"Pb"	132.2	"Zn"	0	"Au"	0.17	"Ag"
1105479.1465583	1143084.4079069	12.7	"Pb"	131.7	"Zn"	0	"Au"	0.16	"Ag"
1103523.5458471	1143920.8387216	10.6	"Pb"	78.4	"Zn"	0	"Au"	0.17	"Ag"
1103504.0386081	1143842.8043599	17.1	"Pb"	116.7	"Zn"	0	"Au"	0.39	"Ag"
1103472.3393447	1143591.6312581	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	0	"Ag"
1103435.7632715	1143352.6510253	11.6	"Pb"	85.1	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1103260.1981204	1143774.5242934	21.7	"Pb"	87.9	"Zn"	0	"Au"	0.56	"Ag"
1103369.9263399	1142699.1132459	11	"Pb"	96.7	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1103240.6908814	1142382.0986514	14.7	"Pb"	96.7	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1103306.5278131	1142008.9968594	8.3	"Pb"	84.6	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1103121.2090424	1142194.3284685	13.5	"Pb"	99.7	"Zn"	0	"Au"	0.17	"Ag"
1105245.0596901	1142162.6270091	7.1	"Pb"	67.6	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105325.5270511	1142274.801404	7.9	"Pb"	80.6	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105347.4726949	1142496.7116202	11	"Pb"	112.9	"Zn"	0	"Au"	0.19	"Ag"
1105320.6502413	1142516.2202106	8.7	"Pb"	87.7	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105269.4437389	1142567.4302605	8.1	"Pb"	73.2	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105276.7589535	1142733.2532791	10.4	"Pb"	87.4	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105347.4726949	1142830.7962313	9.2	"Pb"	97.6	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105515.7226314	1142916.1463144	6.1	"Pb"	63.4	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105708.3566167	1142116.2941068	0	"Pb"	120	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1105974.1427483	1142235.7842232	0	"Pb"	119.8	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1105993.6499873	1142343.0814705	0	"Pb"	81.1	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1106149.7078994	1142425.9929799	0	"Pb"	70.8	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106210.6680213	1142477.2030297	0	"Pb"	0	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106169.2151384	1142513.7816368	0	"Pb"	55.1	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106308.2042164	1142525.9745058	0	"Pb"	108.3	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1106291.1353823	1142557.6759653	0	"Pb"	88	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106944.6278893	1142928.3391834	0	"Pb"	296.4	"Zn"	0	"Au"	0.9	"Ag"
1106966.5735331	1142955.1634953	0	"Pb"	317.9	"Zn"	0	"Au"	1.5	"Ag"
1106866.5989332	1142286.994273	0	"Pb"	340	"Zn"	0	"Au"	1.3	"Ag"
1106856.8453137	1142252.8542398	0	"Pb"	127.2	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107061.6713233	1142165.0655829	0	"Pb"	96.3	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107064.1097282	1142211.3984851	0	"Pb"	130	"Zn"	0.3	"Au"	nd	"Ag"
1107110.4394209	1142894.1991502	11.9	"Pb"	306.6	"Zn"	0.05	"Au"	0.72	"Ag"

1107227.482855	1142152.8727138	15.5	"Pb"	135	"Zn"	0.144	"Au"	0.33	"Ag"
1107707.8486157	1142230.9070756	8.7	"Pb"	89.3	"Zn"	0.1	"Au"	0.15	"Ag"
1107517.6530353	1142981.9878071	8.4	"Pb"	62.7	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107732.2326645	1142252.8542398	10.2	"Pb"	93.9	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107632.2580645	1142677.1660817	9.1	"Pb"	75.9	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1107712.7254255	1142286.994273	16	"Pb"	90.4	"Zn"	56.369	"Au"	0.8	"Ag"
1103274.8285497	1141404.2305561	12.2	"Pb"	99.7	"Zn"	0.05	"Au"	0.15	"Ag"
1105254.8133096	1141811.4723813	12.3	"Pb"	77.4	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105267.005334	1141684.6665435	7.1	"Pb"	61.6	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105240.1828804	1141523.7206725	9.2	"Pb"	60.3	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105247.498095	1141384.7219656	8.9	"Pb"	62.5	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105359.6647193	1141950.4710881	9.3	"Pb"	78.2	"Zn"	0.05	"Au"	nd	"Ag"
1105391.3639827	1141896.8224644	11.6	"Pb"	83.1	"Zn"	0	"Au"	0.15	"Ag"
1105654.7117094	1141896.8224644	0	"Pb"	108.7	"Zn"	0.03	"Au"	0.2	"Ag"
1105569.3675387	1141348.1433586	000	"Pb"	117.1	"Zn"	"nd"	"Au"	0.3	"Ag"
1105501.0922022	1141045.7602069	11.9	"Pb"	102.4	"Zn"	0	"Au"	0.26	"Ag"
1105618.1356363	1141077.4616664	10.6	"Pb"	81.2	"Zn"	0	"Au"	0.16	"Ag"
1105635.2044704	1141104.2859782	12.3	"Pb"	92.6	"Zn"	0	"Au"	0.18	"Ag"
1105803.4544069	1141406.6691299	0	"Pb"	112.3	"Zn"	0.02	"Au"	0.2	"Ag"
1105925.3746507	1141453.0020321	0	"Pb"	90.8	"Zn"	"nd"	"Au"	0.2	"Ag"
1105849.7840996	1141296.9333087	0	"Pb"	69.1	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105942.4434849	1141294.4947349	0	"Pb"	94.5	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1105876.6065532	1141162.8117495	0	"Pb"	73.3	"Zn"	"nd"	"Au"	nd	"Ag"
1105854.6609093	1141109.1631258	0	"Pb"	94.3	"Zn"	0.02	"Au"	nd	"Ag"
1106044.8564897	1141401.7919823	0	"Pb"	54.4	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106283.8201676	1141689.5436911	0	"Pb"	134.3	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106552.0447041	1141911.4539073	0	"Pb"	92.1	"Zn"	0.38	"Au"	nd	"Ag"
1106437.4396749	1141021.3744689	0	"Pb"	93.2	"Zn"	0.76	"Au"	4.8	"Ag"
1106617.8816358	1141150.6188805	0	"Pb"	72.6	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106637.3888748	1141135.9874377	0	"Pb"	127.5	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1106883.6677673	1141791.9637909	0	"Pb"	162.1	"Zn"	0.03	"Au"	nd	"Ag"
1107078.7401575	1141738.3151672	0	"Pb"	149.7	"Zn"	0.12	"Au"	nd	"Ag"
1107142.1386843	1141757.8237576	19.4	"Pb"	152.3	"Zn"	0.05	"Au"	0.22	"Ag"
1107147.015494	1141416.4234251	0	"Pb"	121.2	"Zn"	0.08	"Au"	nd	"Ag"
1107129.9466599	1141377.4062442	0	"Pb"	272.1	"Zn"	0	"Au"	0.9	"Ag"

1107151.8923038	1141294.4947349	0	"Pb"	170.6	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1107164.0843282	1141221.3375208	0	"Pb"	130	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1107232.3596647	1141189.6360613	0	"Pb"	233.4	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1108105.3086106	1141535.9135415	16.2	"Pb"	90.3	"Zn"	0	"Au"	0.4	"Ag"
1108110.1854204	1141555.4221319	13.8	"Pb"	81.6	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1106420.3708407	1140950.6558286	0	"Pb"	52.7	"Zn"	0.18	"Au"	0.2	"Ag"
1106500.8382017	1140970.164419	0	"Pb"	108.6	"Zn"	0.07	"Au"	0.7	"Ag"
1106608.1280163	1140779.9556623	0	"Pb"	74.5	"Zn"	0.03	"Au"	nd	"Ag"
1106598.3743967	1140753.1313505	0	"Pb"	44.4	"Zn"	0.16	"Au"	nd	"Ag"
1106415.494031	1140667.7812673	0	"Pb"	80.2	"Zn"	0	"Au"	0.8	"Ag"
1106444.7548895	1140638.5183817	0	"Pb"	1778	"Zn"	0.06	"Au"	4.3	"Ag"
1106466.7005334	1140326.3809348	8	"Pb"	80	"Zn"	0	"Au"	0.14	"Ag"
1106447.1932944	1140294.6794753	14	"Pb"	96	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1106293.5737871	1140094.7164234	12	"pb"	84	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1107200.6604013	1140789.7099575	0	"Pb"	106.2	"Zn"	0.45	"Au"	nd	"Ag"
1107181.1531623	1140738.4999076	0	"Pb"	85.5	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1107373.7871476	1140501.9582487	11	"Pb"	74	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1107444.500889	1140087.400702	10	"Pb"	132	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1107483.515367	1140048.3835212	14	"Pb"	88	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1108010.2108204	1140289.8023277	12	"Pb"	66	"Zn"	0	"Au"	1	"Ag"
1108410.1092202	1140701.9213006	12.8	"Pb"	77.8	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1108436.9316739	1140726.3070386	14.5	"Pb"	68.8	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1105327.9654559	1140736.0613338	7.3	"Pb"	62.1	"Zn"	0.08	"Au"	0.15	"Ag"
1105379.1719583	1140714.1141696	13.3	"Pb"	102.6	"Zn"	0.06	"Au"	0.62	"Ag"
1105332.8422657	1140516.5896915	8.6	"Pb"	54	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1105379.1719583	1140477.5725106	15.4	"Pb"	104.5	"Zn"	0	"Au"	0.96	"Ag"
1104598.8823978	1140289.8023277	17.5	"Pb"	125.8	"Zn"	1.606	"Au"	0.64	"Ag"
1102806.6548133	1140187.382228	8.3	"Pb"	69.1	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102738.3794768	1140350.7666728	10	"Pb"	72.7	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102411.6332233	1140653.1498245	11	"Pb"	83.5	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102418.9484379	1140875.0600406	10.6	"Pb"	82.3	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102365.3035306	1140875.0600406	10.7	"Pb"	84.6	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102394.5643891	1140102.0321448	8.3	"Pb"	72.5	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1102123.9014478	1139636.2645483	10.7	"Pb"	94	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1104657.4041148	1139909.3848143	11.1	"Pb"	66.5	"Zn"	0.05	"Au"	0.19	"Ag"

1105306.019812	1139631.3874007	18.3	"Pb"	86.3	"Zn"	0.295	"Au"	0.46	"Ag"
1105498.6537973	1139789.8946979	27.5	"Pb"	86	"Zn"	0.137	"Au"	0.18	"Ag"
1105564.490729	1139833.7890264	17.9	"Pb"	127	"Zn"	0.212	"Au"	0.27	"Ag"
1107173.8379477	1139011.9896545	18.6	"Pb"	15.2	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1107188.4683769	1139055.883983	14.3	"Pb"	10.4	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1107456.6929134	1139111.9711805	132.7	"Pb"	65.5	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1107444.500889	1139051.0068354	15.3	"Pb"	80.9	"Zn"	0	"Au"	0.2	"Ag"
1103755.1943104	1138746.1851099	11.6	"Pb"	78.5	"Zn"	0	"Au"	nd	"Ag"
1104050.2413005	1138258.4703492	10.8	"Pb"	108.4	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"
1104094.1325883	1138287.7332348	11.8	"Pb"	85.7	"Zn"	0	"Au"	0.3	"Ag"

**Anexo 3. Sensibilidad.**

Matriz nivel 2				AUTOVETOR		AC				
	RB	TR	IB							
RB	1	1/7	1/3	0.08	0.25	0.09	0.11	0.05		3.01
TR	7	1	5	0.72	2.27	0.64	0.74	0.79		3.14
IB	3	1/5	1	0.19	0.59	0.27	0.15	0.16		3.04
SOMA	11.00	1.34	6.33	1.00	3.11	1.00	1.00	1.00		3.07
				IC=	0.03	RC=	0.06			

Matrices nivel 3											
RB	F	OH	A	AUTOVETOR	AC						
F	1	1	1/2	0.23	0.71	0.25	0.16666667	0.285714	0.333333	3.033898	
OH	1	1	1/4	0.19	0.57	0.25	0.16666667	0.142857	0.333333	3.031915	
A	2	4	1	0.58	1.79	0.5	0.66666667	0.571429	0.333333	3.09589	
			4.00000	6.00000	1.75000	IC=		0.03	RC=	0.05	3.053901
TR	OH	A	S	AUTOVETOR	AC						
OH	1	1	3	0.41	1.23	0.428571	0.45454545	0.333333		3.033215	
A	1	1	5	0.48	1.46	0.428571	0.45454545	0.555556		3.044132	
S	1/3	1/5	1	0.11	0.35	0.142857	0.09090909	0.111111		3.010042	
			2.33333	2.20000	9.00000	IC=		0.01	RC=	0.03	3.02913
IB	OH	A	S	AUTOVETOR	AC						
OH	1	1/5	1/7	0.07	0.22	0.076923	0.04761905	0.096774		3.012692	
A	5	1	1/3	0.28	0.87	0.384615	0.23809524	0.225806		3.062387	
S	7	3	1	0.64	2.01	0.538462	0.71428571	0.677419		3.121457	
			13.00000	4.20000	1.47619	IC=		0.0328	RC=	0.062992	3.065512

Matrices nivel 4											
F	L1	L2	L3	AUTOVETOR	AC						
L1	1	1	1	0.33	1.00	0.333333	0.33333333	0.333333		3	
L2	1	1	1	0.33	1.00	0.333333	0.33333333	0.333333		3	
L3	1	1	1	0.33	1.00	0.333333	0.33333333	0.333333		3	
			3.00000	3.00000	3.00000	IC=		0.0000	RC=	0	3
OH	L1	L2	L3	AUTOVETOR	AC						
L1	1	4	5	0.67	2.11	0.689655	0.75	0.555556		3.170547	
L2	1/4	1	3	0.23	0.71	0.172414	0.1875	0.333333		3.067703	
L3	1/5	1/3	1	0.10	0.31	0.137931	0.0625	0.111111		3.022598	
			1.45000	5.33333	9.00000	IC=		0.04	RC=	0.08	3.086949
A	L1	L2	L3	AUTOVETOR	AC						
L1	1	1/3	3	0.27	0.83	0.230769	0.21052632	0.375		3.067163	
L2	3	1	4	0.61	1.90	0.692308	0.63157895	0.5		3.131798	
L3	1/3	1/4	1	0.12	0.36	0.076923	0.15789474	0.125		3.023441	
			4.33333	1.58333	8.00000	IC=		0.04	RC=	0.07	3.074134
S	L1	L2	L3	AUTOVETOR	AC						
L1	1	2	1/5	0.19	0.59	0.153846	0.28571429	0.137931		3.061417	
L2	1/2	1	1/4	0.13	0.40	0.076923	0.14285714	0.172414		3.030435	
L3	5	4	1	0.68	2.16	0.769231	0.57142857	0.689655		3.194849	
			6.50000	7.00000	1.45000	IC=		0.05	RC=	0.09	3.095567

AGREGACION NIVELES 3 Y 4												
NIVEL 4					MMULT 3-4							
	F	OH	A	S		RB	TR	IB		RB	TR	IB
L1	0.33	0.67	0.27	0.19	F	0.23	0.00	0.00	L1	0.36	0.42	0.25
L2	0.33	0.23	0.61	0.13	OH	0.19	0.41	0.07	L2	0.47	0.40	0.27
L3	0.33	0.10	0.12	0.68	A	0.58	0.48	0.28	L3	0.17	0.18	0.48
					S	0.00	0.11	0.64				

NIVEL 3-4			NIVEL 2			PESOS FINALES		
	RB	TR	IB					
L1	0.36	0.42	0.25	RB	0.08	L1	0.38	
L2	0.47	0.40	0.27	TR	0.72	L2	0.38	
L3	0.17	0.18	0.48	IB	0.19	L3	0.23	
			1.00	1.00	1.00	1.00		

VARIANTE MULTIPLICATIVA	
L1/L2	1.00
L2/L3	1.76
L1/L3	1.76