

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ciencias
Escuela Profesional de Química



**“ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR
ARSÉNICO DE LOS HABITANTES DE MAYOC”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

LICENCIADO EN QUÍMICA

LIRA ESTHER VELIS PAJUELO

LIMA – PERU

2002

AGRADECIMIENTO

A los maestros de la Universidad Nacional de Ingeniería, en especial a la Licenciada Patricia Rosario López Pino de la Escuela Profesional de Química, quienes contribuyen a la formación integral de los estudiantes.

DEDICATORIA

A Don Jorge Manuel Velis Meris, Doña María Esther Pajuelo Milla y Don Mariano Pacheco Ortiz, quechuahablantes y dignos representantes de nuestra cultura milenaria.

RESUMEN

El arsénico es un metaloide que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, encontrándose presente en más de 200 especies minerales, de las cuales la más común es la arsenopirita. La extracción y fundición de metales no ferrosos y la utilización de combustibles fósiles son los principales procesos industriales que contribuyen a la contaminación antropogénica del aire, el agua y el suelo con arsénico. La mayor parte del arsénico se libera en la atmósfera como As_2O_3 , y se mantiene sobre todo adsorbido sobre la materia particulada, el viento y la precipitación pluvial dispersa estas partículas que vuelven al suelo mediante deposición húmeda o seca. La exposición humana no ocupacional al arsénico en el medio ambiente se produce fundamentalmente a través de la ingestión de alimentos y de agua, de estos, suelen ser los alimentos los que más contribuyen a la ingesta diaria de arsénico total. Es así que desde principios del siglo pasado, debido a las operaciones de la fundición Tamboraque, los habitantes de la zona de Mayoc vienen siendo afectados por el arsénico producido como producto residual de las operaciones metalúrgicas. Desde casi mediados de siglo, la planta de beneficio de Tamboraque realiza operaciones de flotación de minerales generando relaves que contribuyen al aumento de los niveles de arsénico contaminante que ya existen en todo el entorno de la zona.

SUMMARY

The arsenic is a nonmetal that is distributed widely in the nature, being presents in more than 200 mineral species, of which the commonest is the arsenopyrite. The nonferrous metal extraction and smelting and the fossil fuel use are the main industrial processes that contribute to the anthropogenic contamination of the air, the water and the ground with arsenic. Most of the arsenic is freed in the atmosphere as As_2O_3 , and it stays adsorbed mainly on the particulate matter, the wind and pluvial precipitation disperse these particles that return to the ground by means of humid or dry deposition. The nonoccupational human exhibition to arsenic in environment takes place fundamentally through the food ingestion and water, of these, usually the foods are that contribute more to the daily total arsenic ingestion. It is so from principles of the last century, due to the operations of the Tamboraque smelting, the inhabitants of the zone of Mayoc come being affected by arsenic produced like residual product of the metallurgical operations. From almost half-full of century, the plant of benefit of Tamboraque conducts operations of mineral flotation generating tailings that contribute to the increase of the polluting arsenic levels which already exist in all the surroundings of the zone.

INDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. Capítulo I: ASPECTOS GENERALES	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodología del estudio	4
1.3.1 Recopilación de la información existente	4
1.3.2 Actividades preliminares al trabajo de campo	4
1.3.3 Trabajo de campo	4
1.3.4 Procesamiento de muestras y datos de campo	5
1.3.5 Obtención y análisis de resultados	5
1.3.6 Conclusiones y recomendaciones	5
1.4 Descripción del área de interés	5
1.4.1 Ubicación y accesibilidad	5
1.4.2 Topografía	10
1.4.3 Clima y meteorología	12
1.4.4 Geología	12
1.4.5 Mineralogía	12
1.4.6 Ambiente socioeconómico	13
1.4.7 Historia	14
1.4.8 Actual mina en explotación	15
1.4.9 Planta concentradora Tamboraque	16
1.4.10 Manejo de residuos	19
1.4.11 Depósito de relaves Mayoc	19
2. Capítulo II: INFORMACIÓN RECOPIADA EN MATERIA DE SALUD Y AMBIENTE	25
2.1 Estudios preliminares	25
2.2 Estándares de comparación	28
2.2.1 Estándares nacionales	28
2.2.2 Estándares internacionales y extranjeros referenciales	30
2.3 Registro de monitoreos de agua, aire y suelo de la zona en estudio	32
2.3.1 Registros de monitoreos de agua	32
2.3.2 Registros meteorológicos	37
2.3.3 Registros de monitoreo de aire	38
2.3.4 Registros de muestreos de suelos	41

2.3.5	Registros de caracterización de relaves	43
2.3.6	Resultados de la evaluación de riesgos por contaminación minera en San Mateo de Huanchor realizado por DIGESA	45
3.	Capítulo III : CARACTERÍSTICAS DEL ARSÉNICO	47
3.1	Geoquímica, hidrogeoquímica y química del suelo	47
3.2	Biogeoquímica y geobotánica	51
3.3	Química del arsénico	56
3.3.1	El elemento	56
3.3.2	Propiedades redox	57
3.3.3	As(-III)	59
3.3.4	As(III)	59
3.3.5	As(V)	62
3.4	Concentración de las menas con arsénico	63
3.4.1	Proceso de flotación	64
3.4.2	Hidrometalurgia	66
3.4.3	Fusión alcalina y otras	67
3.4.4	Propiedades termodinámicas del arsénico	70
3.4.5	Condensación de arsénico a partir de gases residuales	72
3.5	Toxicidad del arsénico	76
3.5.1	Mecanismo de acción	76
3.5.2	Medidas de salud y seguridad	77
4.	Capítulo IV: METODOLOGÍAS APLICADAS	80
4.1	Meteorología de la contaminación del aire	80
4.1.1	La atmósfera	80
4.1.2	Movimiento atmosférico horizontal	81
4.1.3	Movimiento vertical en la atmósfera	83
4.1.4	Vientos	84
4.1.5	Modelos de concentración de contaminantes del aire	89
4.2	Métodos de muestreos y análisis de contaminantes	95
4.2.1	Muestreo y análisis de los contaminantes del aire	95
4.2.1.1	Toma de muestras de polvo por sedimentación bajo la fuerza de la gravedad (sedimentación de polvo)	99
4.2.1.2	Toma de muestra de polvo por filtración (macropartículas en suspensión)	106
4.2.2	Posibles contaminantes del agua	120
4.2.2.1	Contaminación de aguas por la actividad minera	121
4.2.2.2	Tipos principales de los contaminantes del agua	122
4.2.2.3	Características físicas y químicas de las aguas	124
4.2.3	Posibles contaminantes del suelo	125
5.	Capítulo V: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN MAYOC	127
5.1	Delimitación del área de interés	127
5.2	Diseño de la red de muestreo y procedimientos	127

5.2.1	Aguas para consumo humano de la población de Mayoc y Daza	128
5.2.2	Calidad de aire y material particulado sedimentado	129
5.2.3	Suelos naturales en la zona contigua al depósito de relaves	133
5.2.4	Relaves del depósito de Mayoc	134
5.3	Análisis químico y resultados	135
5.3.1	Aguas para consumo humano de la población de Mayoc y Daza	135
5.3.2	Calidad de aire y material particulado sedimentado	139
5.3.3	Suelos naturales en la zona contigua al depósito	140
5.3.4	Relaves del depósito de Mayoc	143
6.	Capítulo VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	148
6.1	Origen de la contaminación por arsénico en la zona de estudio	148
6.2	Dispersión y transporte de arsénico en Mayoc	149
6.3	Presencia de arsénico en la zona de interés	150
6.4	Presencia de arsénico en los habitantes	150
7.	Capítulo VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	152
7.1	Conclusiones	152
7.2	Recomendaciones	156
	Bibliografía	157
	Anexos	159

INDICE DE ANEXOS

	Pág.	
1.	Bioxidación de arsenopirita aurífera en la planta Tamboraque	160
2.	Consolidado de valores límites de la Ley General de Aguas	169
3A.	Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire	
3B.	Niveles máximos permisibles de emisiones de gases y partículas para las actividades minero-metalúrgicas	172
4A.	Estándares Nacionales de la Calidad del Aire – EPA	
4B.	Normas sobre control de la contaminación atmosférica – Venezuela	
4C.	Reglamento de Ontario 308	183
4D.	Valores límites para la protección de la salud pública de contaminantes no tradicionales en Bolivia, Venezuela y Costa Rica	
5.	Datos meteorológicos	195
6A.	Informes de ensayo – DIGESA	206
6B.	Determinación de arsénico y plomo en material biológico	
7A.	Estándar ASTM D4096-89	212
7B.	Estándar ASTM D1739-89	
8A.	Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua – MEM	219
8B.	Método Normalizado APHA AWWA WPCF 2540D	
9.	Estándar Internacional ISO 6595-1982 (E)	223
10.	Certificado de calibración STAPLEX	229

11.	Procedimiento de tratamiento de muestras de suelo	232
12.	Determinación volumétrica de arsénico por Bromatometría	234

INDICE DE DIAGRAMAS

	Pág.	
1.	Líneas de producción de la planta de beneficio Tamboraque	18
2.	Arsénico en orina – Localidad de San Mateo de Huanchor	46
3.	Eh – pH del arsénico. $C = 10^{-2}$ M	58
4.	Log C – pH para As (III) 1,0 M	61
5.	Log C – pH para As (V) 10^{-2} M	63
6.	Potencial químico oxígeno / azufre para Sistemas Ternarios M-S-O a 700°C	70
7.	Presiones de vapor de especies volátiles de arsénico, antimonio y bismuto. La ordenada derecha indica la velocidad de vaporización relativa en el flujo de gas forzado	72
8.	Composición esperada del gas y constitución del polvo durante el enfriamiento del gas junto al aire de ingreso (conteniendo 200 moles de O_2) y polvo ingresado	74
9.	Curva de calibración del As en DEDTCAg/piridina a 538 nm	137

INDICE DE FIGURAS

	Pág.	
1.	Representación esquemática de la circulación general de la atmósfera	82
2.	Ciudad rectangular en la que se indica el significado de los símbolos usados en el modelo de la caja fija	92
3.	Colector sencillo de polvo	100
4.	Muestreador PTS de alto volumen	114
5.	Plantillas para seccionar tiras de filtro	141
6.	Método sugerido para el seleccionamiento de tiras de filtro	141

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.	
1.	Vista aérea general de la zona de interés	09
2.	Vista de Mayoc del SW al NE	10
3.	Vista de Mayoc de Norte a Sur	11
4.	Vista del emplazamiento total de la relavera	11

INDICE DE MAPAS

	Pág.
1. Accesibilidad a Mayoc	07
2. Ubicación de Mayoc	08
3. Puntos de control y estaciones de calidad de aguas y efluentes	33
4. Puntos de control de calidad de aire	39

INDICE DE CROQUIS

	Pág.
1. Instalaciones de la planta Tamboraque	21
2. Manejo de efluentes de la relavera en condiciones normales y de emergencia	22
3. Dimensiones del depósito de relaves Mayoc	24
4. Ubicación de puntos de muestreo	136

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Distribución general de la población de San Mateo de Huanchor	13
2. Las diez primeras causas de morbilidad en el distrito	13
3. Valores límites de aguas según el uso	29
4. Niveles máximos permisibles de calidad de aire (Anexo N°3 de la RM)	30
5. Estándares nacionales de calidad ambiental de aire (Anexo 1 del DS)	30
6. Estándares nacionales de calidad de aire ambiental (USEPA)	31
7. Límites máximos de contaminantes del aire (Venezuela)	31
8. Normas propuestas de calidad de aire ambiental (Ontario)	32
9. Descripción de puntos de control de aguas relacionados con el estudio	32
10. Resultados de muestreos de aguas	35
11. Resumen de datos meteorológicos	37
12. Descripción de puntos de control de aire relacionados con el estudio	38
13. Resultados de muestreo de aire	40
14. Resultados de muestreo de suelos	42
15. Características de la mezcla de relaves a ser compactados (EQUAS)	43
16. Características de relaves almacenados (Fuente: MLPSA)	44
17. Algunos minerales comunes de arsénico	48
18. Rangos y promedios de concentraciones de As (μg) en suelos y Armeria marítima (Am) en materia seca	55
19. Concentraciones de As (μg) en materia seca en algunas plantas colonizantes de tierras contaminadas en el sitio Poldice	56
20. Composición de concentrado de cobre (1000 mol de concentrado de Cu pesan 205,8 Kg)	73
21. Cantidades de cada gas (en moles) que se equilibran con mata de	73

	cobre al 65% y escoria	
22.	Presión de vapor de As_2O_3 (atm) de acuerdo a la relación $2\text{As}_2\text{O}_3 = \text{As}_4\text{O}_6$ (g)	74
23.	Velocidades de sedimentación de varias partículas 18°C	98
24.	Puntos de muestreo de aguas	128
25.	Puntos de monitoreo de aire (Fechas 12, 13 y 14.02.2001)	130
26.	Puntos de muestreo de polvo sedimentado (Fecha: 15.02.2001)	133
27.	Puntos de muestreo de suelos naturales (Fechas: 14 y 15.02.2001)	134
28.	Puntos de muestreo de relaves (Fecha: 13.02.2001)	134
29.	Resultados de análisis químico de aguas de consumo humano	138
30.	Datos del monitoreo de PTS	139
31.	Resultados de análisis químico de monitoreo de Partículas Totales en Suspensión (PTS)	142
32.	Resultados de análisis químico de monitoreo de Material Particulado Sedimentado (PS)	142
33.	Expresión de resultados de análisis químico de PTS en concentración peso/peso	143
34.	Resultados de análisis químico de suelos naturales	143
35.	Resultados de análisis químico de relaves	145
36.	Resultado de análisis mineralógico de relaves	146

ABREVIATURAS

1.	A	Área
2.	Ac	Área de la boca de la jarra colectora (m^2)
3.	APHA	American Public Health Association
4.	ASTM	American Society for Testing and Materials Standard
5.	AWWA	American Water Works Association
6.	b	Concentración de fondo
7.	BAL	British Antilewisita: 2,3-dimercapto propanol, antídoto recomendado en casos de envenenamiento con As (III), que inhibe las enzimas cofactores que poseen grupos tioles, como la descarboxilación oxidativa de los ácidos cetónicos, principalmente del ácido pirúvico. El complejo BAL-As es eliminado en orina.
8.	C	Concentración
9.	cfm	cubic feet per minute: pies cúbicos por minuto
10.	Consultcont SAC	Consultores y Contratistas Generales SAC
11.	D	Diámetro de partícula
12.	DEDTC-Ag	Dietilditiocarbamato de plata
13.	DGM	Dirección General de Minería
14.	DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
15.	DS	Decreto Supremo
16.	EAI	Empresa de Auditoría e Inspectoría
17.	Ec	Ecuación

18.	EEUU	Estados Unidos
19.	EPA	Environmental Protection Agency
20.	EQUAS	Environmental Quality Assurance Services SA
21.	G.E.	Gravedad específica
22.	H	Altura
23.	ha	Hectárea
24.	HDPE	High Density Polyethylene
25.	Hi-Vol	Dispositivo de toma de muestras de aire de alto volumen
26.	HR	Humedad relativa
27.	INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
28.	ISO	International Standards Organization
29.	L	Largo
30.	MEM	Ministerio de Energía y Minas
31.	MLPSA	Minera Lizandro Proaño SA
32.	mm	milímetro
34.	NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
35.	Nd	Número de días de exposición
36.	NE	Nor Este
37.	NMP	Niveles máximos permisibles
38.	ONERN	Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales
39.	PM10	Material particulado fino, partículas suspendidas en su fracción respirable, de hasta 10 micrómetros en tamaño.
40.	Q	Índice de emisiones de contaminantes del aire
41.	q	Unidad de área
43.	RD	Resolución Directoral
44.	RM	Resolución Ministerial
45.	SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado
46.	SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
47.	SGS	Société Generale de Surveillance SA.
48.	STD	Sólidos Totales Disueltos
49.	SW	Sur Este
50.	TMH	Toneladas métricas húmedas.
51.	TMS	Toneladas métricas secas. Cuando se usa con respecto a concentrados, excluye el agua contenida en el concentrado.
52.	TSS	Sólidos totales en suspensión
53.	u	Velocidad del viento
54.	UP	Unidad de producción
55.	USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
56.	UTM	Universal Transverse Mercator
57.	Vt	Velocidad relativa de sedimentación de la partícula
58.	W	Ancho
59.	WPCF	Water Pollution Control Federation
60.	W _i	Peso de sólidos insolubles
61.	W _s	Peso de sólidos solubles
62.	W _t	Peso de sólidos totales
63.	x	Dirección del viento

CONTAMINANTES

- | | | |
|-----|-----------------------------|---|
| 1. | Ácido dimetilarsónico | Ácido cacodílico, $(\text{CH}_3)_2 \text{AsO}(\text{OH})$ |
| 2. | Ácido metilarsínico | Ácido metanoarsónico, $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$ |
| 3. | Ácido ortoarsénico | (H_3AsO_4) Ácido poco menos fuerte que el H_3PO_4 . |
| 4. | Ácido ortoarsenioso | (H_3AsO_3) Ácido muy débil de As (III). |
| 5. | Arsenatos | Compuestos de As (V). En aguas oxidantes, el arsénico se encuentra en la forma de arsenatos. |
| 6. | Arsenitos | Compuestos de As (III). En aguas reductoras, el arsénico se encuentra en la forma de arsenitos. |
| 7. | Arsenobetaina | $(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{COOH}$, forma orgánica del arsénico. Los peces y crustáceos son los que más contenido de arsénico presentan generalmente en forma de arsenobetaina, menos tóxica que el arsénico inorgánico. |
| 8. | Arsenocolina | $(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, forma orgánica del arsénico, relativamente no tóxica. |
| 9. | Arsenolita | El óxido, As_4O_6 , se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico. El trióxido de arsénico para uso medicinal se obtiene por sublimación de la arsenolita. |
| 10. | Arsenopirita
(Mispíquel) | Mineral sulfuro de As y Fe (FeAsS) |
| 11. | Arsina | AsH_3 , hidruro de arsénico, gas venenoso. |
| 12. | Metilarsina | Derivado metilado de la arsina, CH_3AsH_2 |
| 13. | Óxido de trimetilarsina | $(\text{CH}_3)_3\text{AsO}$ |
| 14. | Pentóxido de arsénico | As_2O_5 , obtenido por deshidratación del ácido ortoarsénico. Menos tóxico que el trióxido, su manejo es peligroso. |
| 15. | Tetrametilarsonio | Compuestos complejos de arsénico orgánico. |
| 16. | Trióxido de arsénico | As_2O_3 , compuesto más importante del arsénico, muy tóxico. Se origina quemando arsénico en el aire. |

GLOSARIO

- | | | |
|----|-----------|--|
| 1. | Aerosoles | Grupo de coloides, caracterizados por su distribución en forma de niebla, de sustancias sólidas o líquidas en el seno de un gas. |
| 2. | Alotropía | Propiedad que poseen determinados elementos químicos de presentarse bajo estructuras |

- moleculares diferentes.
3. Amorfo Sin forma regular o bien determinada.
 4. Anemómetros Aparato para medir la velocidad o densidad del viento.
 5. Biolixiviación Solubilización de los sulfuros metálicos mediante reacciones de oxidación catalizadas por algunas bacterias que utilizan la energía liberada en el proceso para su metabolismo.
 6. Emplazamiento Situación, ubicación.
 7. Escorrentías Lámina de agua que circula en cuenca de drenaje.
 8. Espesador Equipo de separación sólido-líquido (tanque) para optimizar el manejo de los relaves y la recuperación y/o posterior tratamiento del agua de proceso en las plantas metalúrgicas.
 9. Fosforitas Son rocas que contienen al menos un 20% de P_2O_5 .
 10. Ganga Materia inútil que envuelve y acompaña a los minerales.
 11. Hi-vol sampler (Muestreador de alto volumen) Equipo que aspira grandes volúmenes de aire y retiene las partículas en un filtro.
 12. Intemperismo Falta de templanza, desigualdad del tiempo.
 13. Mena Mineral metalífero.
 14. Overflow Rebose del espesador, fase más ligera de la separación.
 15. Pentavalentes Elemento o compuesto con valencia cinco.
 16. Refractario Elemento o sustancia que resiste altas temperaturas sin sufrir alteración.
 17. Relave Producto de desecho de los diversos procesos minero metalúrgicos.
 18. Relavera Lugar de deposición de los relaves generados en la planta concentradora.
 19. Rocas ígneas (Del latín igneus) o magmáticas se forman a partir de la solidificación de un fundido silicatado o magma. La solidificación del magma y su consiguiente cristalización puede tener lugar en el interior de la corteza, tanto en zonas profundas como superficiales, o sobre la superficie exterior de ésta.
 20. Rocas ígneas volcánicas Si la cristalización tiene lugar en una zona profunda de la corteza a las rocas así formadas se les denominan rocas intrusivas o plutónicas (de Plutón, el dios del mundo inferior en la mitología clásica). Por el contrario, si la solidificación magmática tiene lugar en la superficie terrestre a las rocas se las denomina rocas extrusivas o volcánicas (de Vulcano, dios del fuego en la mitología clásica que tenía su residencia bajo el volcán Etna).

- 21. Rocas sedimentarias Se forman por acumulación de sedimentos que, sometidos a procesos físicos y químicos, resultan en un material de cierta consistencia.
- 22. Terraplén Espacio de tierra y piedras, barranco.
- 23. Trivalentes Elemento o compuesto con valencia tres.
- 24. Trocha Vereda angosta, camino abierto en la maleza. Sendero.
- 25. Underflow Fase más densa de la pulpa descargada en la parte inferior del espesador.
- 26. Vítreo De vidrio o parecido al vidrio.

INTRODUCCIÓN

Los cambios notados en la salud de las personas en el ambiente rural de la localidad "Glorieta de Mayoc", ubicada en el distrito de San Mateo de Huanchor, se atribuyen a la migración del material particulado contenido en el Depósito de Relaves Mayoc de Minera Lizandro Proaño SA localizado en las proximidades de la localidad. Este problema motiva el presente informe de suficiencia profesional, que tiene por objetivo proponer el proceso de contaminación por arsénico del entorno de la relavera Mayoc y como consecuencia realizar una propuesta conceptual de mitigación. Para tal fin se realiza una revisión bibliográfica; se recopila información existente de la zona como mapas, descripción de las actividades mineras de la zona, así como, estudios o registros en materia de ambiente y salud; se diseña y ejecuta una red de muestreo de aguas de bebida, material particulado suspendido y sedimentado, suelos y relave; se procesan las muestras y todos los datos obtenidos para finalmente obtener conclusiones sobre la contaminación y presentar las recomendaciones respectivas.

El presente estudio es desarrollado a nivel exploratorio sobre la problemática ambiental peruana por el elemento arsénico producto de la actividad minero-metalúrgica y está limitado por los recursos económicos de las personas involucradas: pobladores y profesionales interesados.

Muchas veces para las empresas mineras en el Perú, invertir en prevención y/o mitigación de la contaminación no produce un rendimiento directo evidente, pero ello no significa que sea una inversión no rentable. Si a una empresa le interesa mantener buenas relaciones públicas, debe hacer un esfuerzo para controlar la contaminación en su propio interés, evitando daños al medio ambiente y a la sociedad en general.

En el presente caso, las exigencias de autoridades y pobladores de la localidad de Mayoc han alertado al estado y a profesionales sobre ocurrencias no contempladas por la legislación ambiental vigente.

CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

El Alcalde del distrito de San Mateo de Huanchor, en representación de los pobladores de la zonas denominadas Daza y Glorieta de Mayoc, hace de conocimiento a las Instituciones del Estado; los cambios notados en la salud de las personas y el ambiente de las zonas en mención, atribuibles a la contaminación por migración del material contenido en el Depósito de Relaves Mayoc de la Compañía Minera Lizandro Proaño SA.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Determinar el medio, la fuente y la ruta de contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc considerando los medios físicos agua, aire y suelo.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Determinar la concentración de arsénico en el medio físico: aire, agua y suelo de la zona de Mayoc.
- 2) Determinar el contenido y las formas químicas del arsénico en las posibles fuentes de contaminación.
- 3) Determinar la ruta de contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc.

1.3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El presente estudio se realiza siguiendo la metodología que ha continuación se describe:

1.3.1 Recopilación de la información existente

La documentación a recopilar y las actividades relacionadas se listan a continuación:

- 1) Mapas, planos y fotografías.
- 2) Información del área de interés: extensión, meteorología, topografía, geología.
- 3) Estudios o informes existentes en materia de ambiente y salud.
- 4) Registros de monitoreo de agentes contaminantes, particularmente arsénico.
- 5) Diagrama de flujo de las operaciones en el Depósito de Relaves y/o la Planta de Beneficio de Mineral correspondiente.
- 6) Información censal de la zona de interés.
- 7) Revisión bibliográfica

1.3.2 Actividades preliminares al trabajo de campo

Como parte de la planificación del trabajo de campo se realizó lo siguiente:

- 1) Determinación de las facilidades, equipo requerido para el trabajo de campo, métodos de muestreo y análisis.
- 2) Delimitación del área de interés.

1.3.3 Trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se ejecutaron las siguientes actividades:

- 1) Diseño de la red de muestreo.
- 2) Monitoreo de material particulado.
- 3) Muestreo de aguas.

- 4) Muestreo de suelos.
- 5) Muestreo de material almacenado en el Depósito de Relaves.

1.3.4 Procesamiento de muestras y datos de campo

Posteriormente al trabajo de campo, se inició el trabajo de gabinete con las siguientes actividades:

- 1) Preparación y análisis de las muestras recogidas.
- 2) Revisión y procesamiento de los datos de campo.

1.3.5 Obtención y análisis de resultados

El trabajo de gabinete se centró principalmente en las siguientes actividades:

- 1) Cálculo de resultados a partir de los datos de laboratorio.
- 2) Análisis de la información preliminar y resultados obtenidos.
- 3) Elaboración de la propuesta del mecanismo de contaminación por As en la zona.
- 4) Elaboración de la propuesta de mitigación ambiental.

1.3.6 Conclusiones y recomendaciones

Se obtuvieron conclusiones y recomendaciones producto del análisis de los objetivos del estudio y de los resultados producto del trabajo de campo y de gabinete.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INTERÉS

1.4.1 Ubicación y accesibilidad

El depósito de relaves Mayoc corresponde a las operaciones de la planta de beneficio de mineral Tamboraque que pertenece a minera Lizandro Proaño SA y se encuentra ubicado en el km 94,5 de la Carretera Central, a 1,5 km de la Planta en mención, en el antiguo

fundo Glorieta de Mayoc (adyacente a la localidad de Daza) en el distrito San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí, departamento de Lima. Geográficamente, el área en estudio está ubicada entre las coordenadas 11°45'-11°47' de latitud y 76°18'-76°20' de longitud en la zona 18.

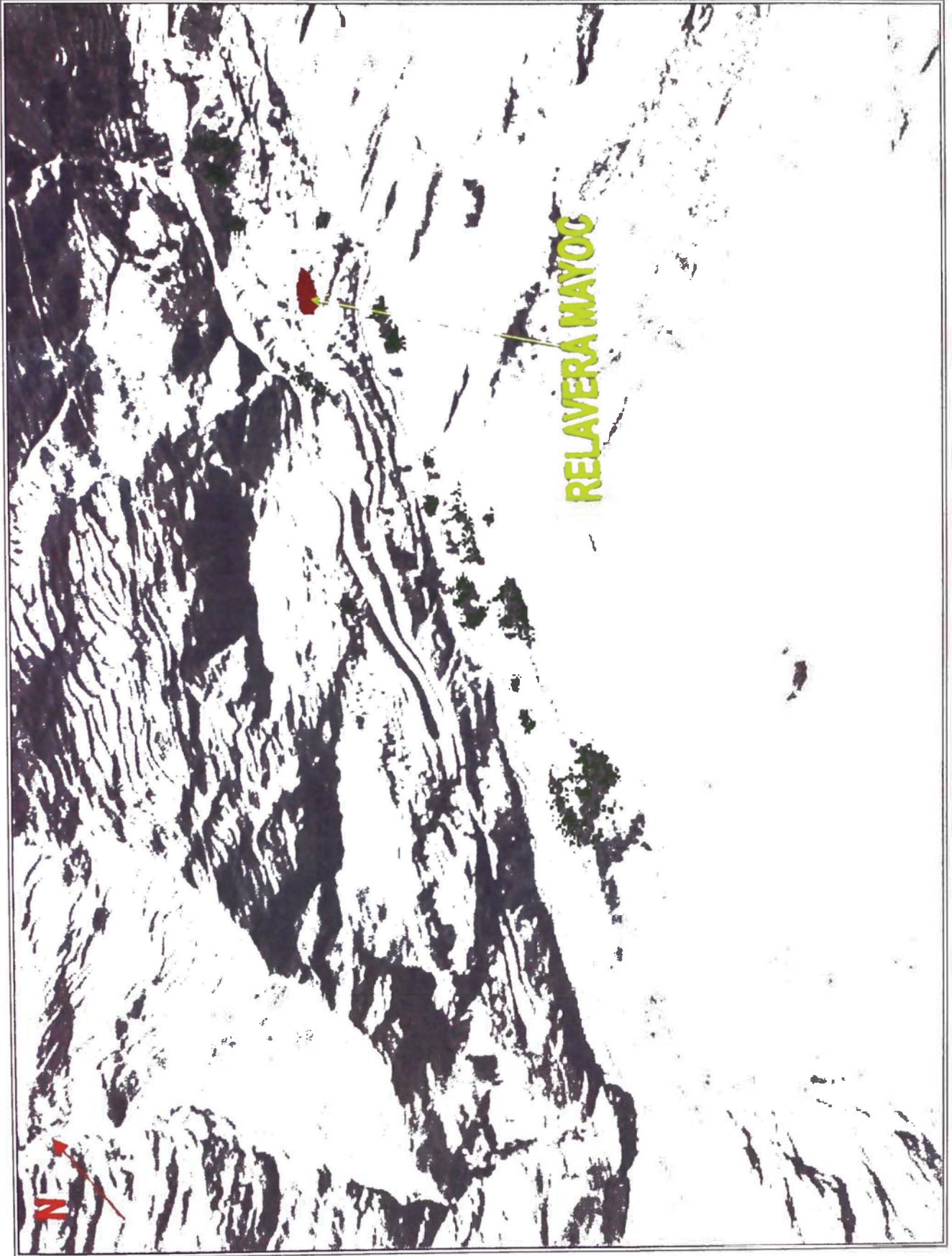
La zona de emplazamiento de la relavera es de fácil accesibilidad, pues se encuentra al pie de la carretera pavimentada, empleándose aproximadamente unas dos horas para transportarse en automóvil desde el centro de la ciudad de Lima a la zona de interés. Las coordenadas UTM promedio de ubicación de la relavera son: 8 697 645,83N; 357 958,57E y 2 940h. **Ver Mapas N°1, N°2 y Fotografía N°1. (1)**



Mapa N°1
 Accesibilidad a Mayoc

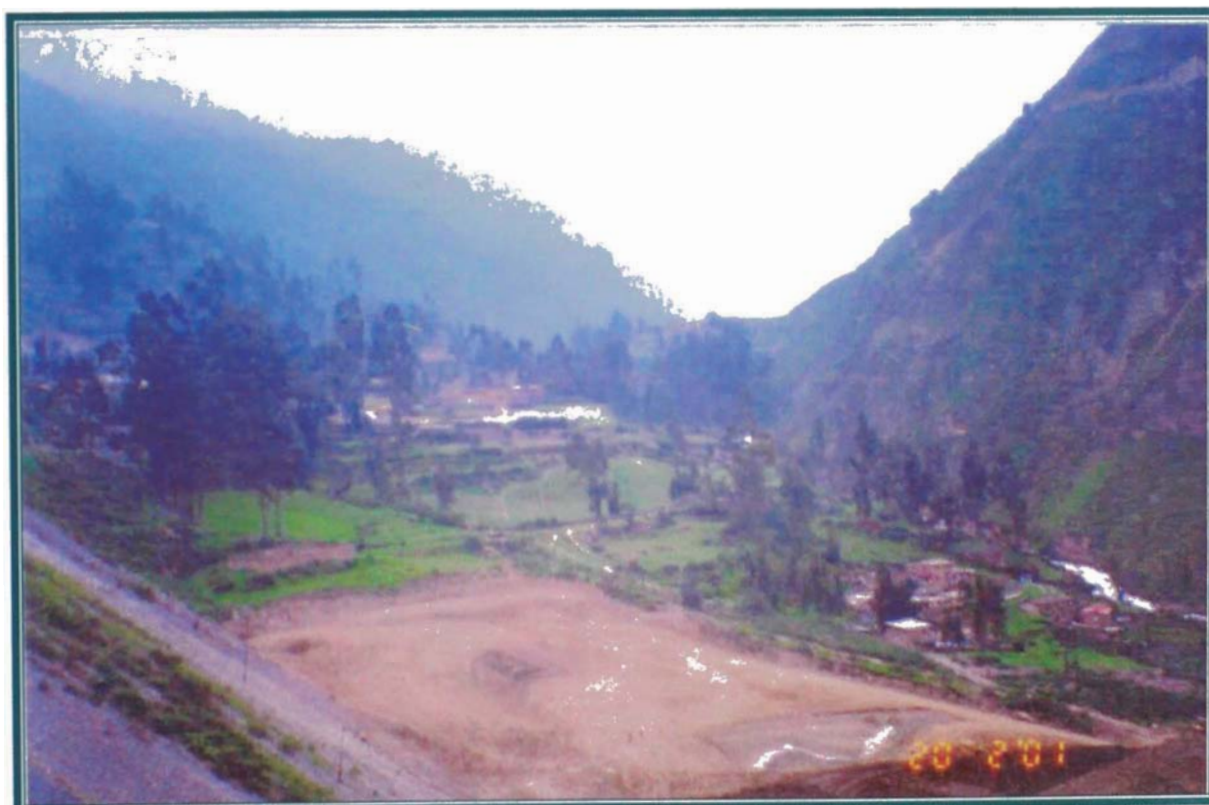


Fotografía N°1. Vista aérea general de la zona de interés

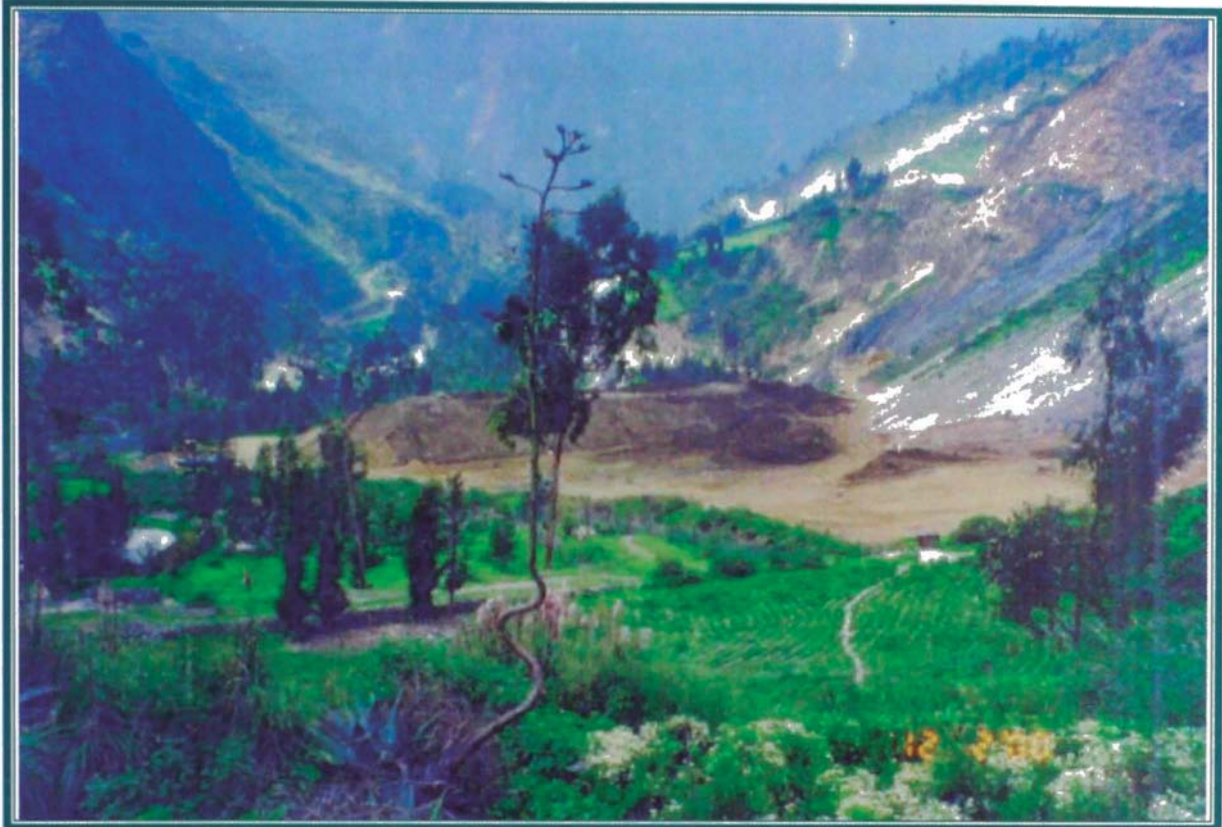


1.4.2 Topografía

La zona en estudio está emplazada en la vertiente occidental de los Andes Centrales, en la cuenca hidrográfica del río Rímac. La topografía muy accidentada, producto de la erosión fluvial, permite desniveles desde 2 800 hasta 4 500 msnm. **Ver Fotografías N°1, N°2 y N°3.** El depósito de relaves Mayoc se encuentra en un área que presenta un relieve relativamente plano, con una suave pendiente en dirección al río Rímac (aproximadamente 6%). La superficie cubierta por los relaves alcanza una extensión de 0,66 ha. **Ver Fotografía N°4. (1)**



FOTOGRAFIA N°2.- Vista de Mayoc del SW al NE, se aprecia las viviendas que constituyen la pequeña localidad y la explanada que se proyectaba para el almacenamiento de relaves.



FOTOGRAFIA N°3.- Vista de Mayoc de Norte a Sur, se aprecia el dique del depósito de relaves proyectado. Curva de la carretera central.



FOTOGRAFIA N°4.- Vista del emplazamiento total de la relavera.

1.4.3 Clima y meteorología

La interacción de las variables: altitud (<3200 msnm), latitud subtropical, circulación atmosférica, etc. determinan que los caracteres climáticos del área correspondan con el subtipo climático frío seco propio de la zona andina, con presencia de heladas moderadas entre mayo y octubre y precipitaciones entre diciembre y abril, con promedios anuales de 1000 mm, siendo la temperatura media anual de 10°C. (2)

1.4.4 Geología

La conformación litológica de Mayoc está representada por rocas ígneas volcánicas y materiales fluvio-aluviónicos. Las rocas volcánicas están constituidas por derrames de lavas y flujos de brechas en colores rojizos violáceos que corresponden a edades del terciario inferior a medio. Los materiales del cuaternario se encuentran en depósitos fluvio-aluvionales formando una terraza lateral en el valle. Los cerros que rodean Mayoc, son los que presentan las mayores áreas rocosas volcánicas, mientras que en las partes bajas se encuentran los depósitos fluvio-aluviales. (2)

1.4.5 Mineralogía

En los yacimientos filonianos del distrito minero se han identificado hasta 15 especies mineralógicas de las cuales las más abundantes son: tetraedrita, arsenopirita, calcopirita, esfalerita, galena, cuarzo y rodocrosita. La arsenopirita tiene una particular importancia por ser la portadora de la mayor parte del oro y algo de la plata. (2)

1.4.6 Ambiente socioeconómico

Según estimados del INEI la población distrital del año 2000 es como sigue:

Tabla N°1
Distribución general de la población de San Mateo de Huanchor

Población	Hombres	Mujeres	Total
Rural	1 036	1 123	2 159
Urbana	2 280	2 104	4 384
Distrital	3 448	3 095	6 543

Tabla N°2
Las diez primeras causas de morbilidad en el distrito

Prelación	Enfermedades	Casos	%
1	Infecciones Respiratorias Agudas	4 094	47,1
2	Infecciosas Intestinales	1 247	14,8
3	Bucal, Glándulas Salivales, Maxilar	779	9,1
4	Causas mal definidas	707	8,2
5	Heridas	405	4,7
6	Desnutrición	327	3,8
7	Esófago, Estómago y Duodeno	307	3,6
8	Traumatismo	270	3,1
9	Aparato Urinario	218	2,6
10	Micosis	214	2,5

Fuente: Centro médico de San Mateo, 1999.

Pobladores de Glorieta de Mayoc.- Conformado por un grupo de 21 familias de las cuáles 12 son parejas jóvenes (menores de 40 años), 19 personas tiene menos de 18 años. Son en su mayoría agricultores subsistentes o subempleados.

Pobladores de Daza.- Constituido por 40 familias migrantes en su mayoría y también comuneros. Su actividad principal es el comercio orientado principalmente al servicio de alimentación a transeúntes usuarios de la Carretera Central (restaurantes de

camino), así mismo a los servicios de taller mecánico y vulcanizadora. (3)

1.4.7 Historia

Se conoce de labores mineras en la zona desde mediados del siglo XIX pero las operaciones de cierta importancia comenzaron en la primera década del siglo XX. Entre estas cabe mencionar la explotación de la veta Colquipallana de la Cia. Minera Parac, la mina Coricancha por la entonces Negociación Minera L.A. Proaño y las minas Fray Martín, Jorge Chávez y Sarita.

En términos generales la zona minera ha sido trabajada en forma intermitente y en pequeña escala. La explotación siempre ha estado limitada a minerales relativamente ricos o enriquecidos por pallaqueo y plantas artesanales.

En 1906 la Negociación Proaño construyó una fundición en Tamboraque para fundir mineral escogido en Coricancha, los daños producidos por los humos de la fundición fueron materia de controversia y roces con la población. En 1939, construyó también en Tamboraque una concentradora por flotación con capacidad para 50 T/día que luego amplió a 300 T/día. Estas instalaciones estuvieron acompañadas por la construcción de un cablecarril de 2 km, 2 centrales hidroeléctricas y obras de infraestructura; la fundición fue paralizada al perfeccionarse la flotación. Desde 1958 la producción fue declinando por diversas causas hasta que en 1964 se paralizaron todas las operaciones.

Un año después se reinició la operación pero solo de la planta concentradora Tamboraque, cuya capacidad había sido reducida a 150 T/día, realizando el tratamiento de mineral para varios mineros vecinos. Desde el cierre de la mina en 1964, en el distrito minero ha habido producción continua sólo en la mina San Marino de la Cía. Minera El Barón SA, que inició operaciones en 1970. Las demás actividades mineras han sido pequeñas y esporádicas, en muchos casos artesanales.

En Tamboraque se han tratado minerales de diversas procedencias: Germania, Pacococha, Morococha y Coricancha (Constancia); por ende, su estadística no refleja la producción de las vetas de la región Viso-Aruri, la cual más bien ha sido irregular y en escala moderada. (2)

1.4.8 Actual mina en explotación

En años recientes se incluye dentro del proceso productivo principalmente a la mina Coricancha, constituida por un conjunto de vetas entre las que destaca la veta Constanza o Coricancha, que es la estructura mineralizada más grande de la mina contando con una potencia promedio de 0,85 a 1,0 m. La mineralogía de la veta Coricancha consiste en galena esfalerítica, esfalerita y calcopirita con valores de Pb, Ag, Zn y Cu, conformando la ganga la pirita, el cuarzo y la calcita.

La producción promedio es de aproximadamente 3 000 TMS/mes con las siguientes leyes promedio:

Elemento	Pb	Ag	Zn	Cu	As
Contenido	1,76%	34,96 Oz/TM	2,95%	0,27%	3,45%

El método de explotación subterránea es el de almacenamiento provisional, de modo que el mineral extraído en los tajos es colectado en un nivel principal de extracción, de donde se conduce a superficie para ser luego transportado a la Planta Concentradora.

(4)

1.4.9 Planta Concentradora Tamboraque

La planta de Tamboraque, realiza un tratamiento integral de los minerales sulfurados provenientes de la UP Coricancha mediante cuatro líneas de producción, generando cuatro tipos de residuos sólidos.

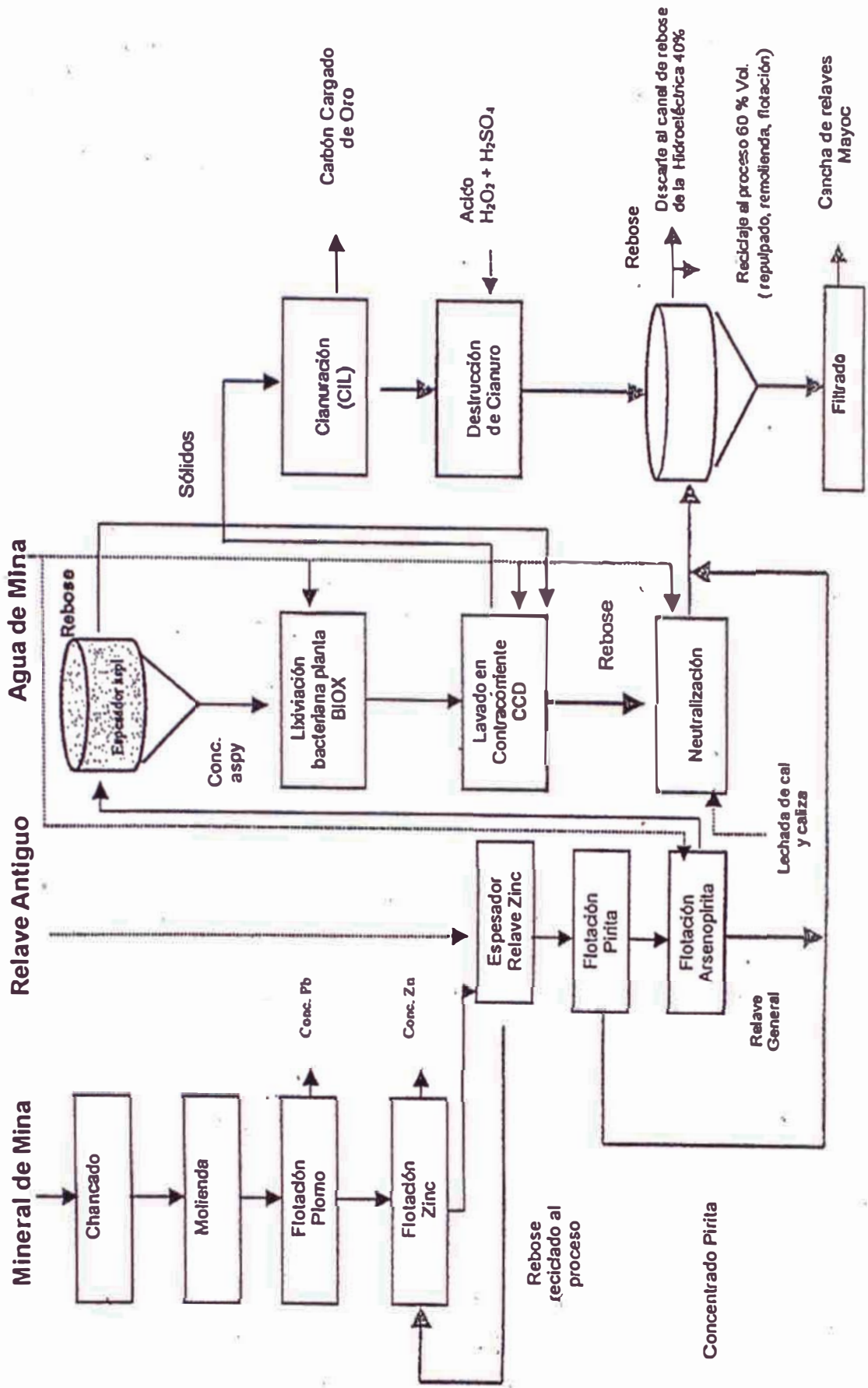
Una primera línea de producción trata los minerales sulfurados provenientes de la UP Coricancha por el método de flotación selectiva, para obtener concentrados de Pb-Ag y de Zn usando reactivos convencionales (CuSO_4 , xantatos y cal) y generando un primer relave o relave de zinc.

La segunda línea somete a tratamiento los relaves generados en la primera conjuntamente con el relave producto de antiguas operaciones en la zona (canchas 1 y 2), separando por flotación un concentrado de Au-arsenopirita, para lo cual usa ácido sulfúrico, xantato, Frother 70 y sulfuro de sodio como reactivos, generando inicialmente un residuo de **concentrado de pirita** y posteriormente un relave denominado **relave general**.

En una tercera línea, el concentrado de Au-arsenopirita ingresa al circuito de biolixiviación, donde se produce la oxidación y disolución de la arsenopirita que después de someterse a un lavado en contracorriente genera un producto sólido con contenido elevado de oro y un efluente líquido que se conduce al circuito de neutralización alcalina. En la Planta de Neutralización el Fe y As, en altas concentraciones, provenientes de la biolixiviación, son transformados en un **precipitado de arseniatos de Fe y Ca**.

La cuarta línea de producción la constituye el circuito de cianuración con carbón en pulpa. Aquí el material sólido es neutralizado con cal, es sometido a cianuración y luego es colocado en contacto con carbón activado para la adsorción del oro disuelto. Este proceso genera un **relave de cianuración**, el que enseguida es sometido a un tratamiento de destrucción de cianuro antes de su disposición final. **Ver Diagrama N°1 y Anexo N°1. (4)**

Diagrama N°1. Líneas de producción de la planta de beneficio Tamboraque



1.4.10 Manejo de residuos

Los residuos generados en las diferentes etapas del proceso y/o líneas de producción, son principalmente reciclados en circuito interno al proceso de beneficio. Como fase final del proceso de producción los residuos de la segunda (relaves de flotación de arsenopirita), tercera (efluente de la planta de neutralización de la línea de lixiviación bacteriana) y cuarta línea de producción (efluente del circuito de destrucción de cianuro) se juntan en un espesador de alta capacidad en donde se logran obtener dos fases: el underflow y el overflow.

La fase más densa denominada underflow, pasa a ser filtrada usando filtro de discos al vacío, obteniéndose el queque (relave final con 20% de humedad aproximadamente) que es almacenado temporalmente en canchas contiguas para luego ser transportado en camiones de 12 y 20 toneladas al depósito de relaves Mayoc.

El rebose del espesador, denominado overflow, con un flujo estimado de 2 540 m³/día, se recicla parcialmente al proceso (1 240 m³/día) y se vierte al canal que conduce el rebose de la central hidroeléctrica (1 300 m³/día) para finalmente ser descargados al río Rímac. **Ver Diagrama N°1. (4)**

1.4.11 Depósito de relaves Mayoc

Durante la primera etapa del proyecto Tamboraque de Minera Lizandro Proaño SA, se planifica y realiza el almacenamiento de relaves producidos en las operaciones, en el área adyacente a la

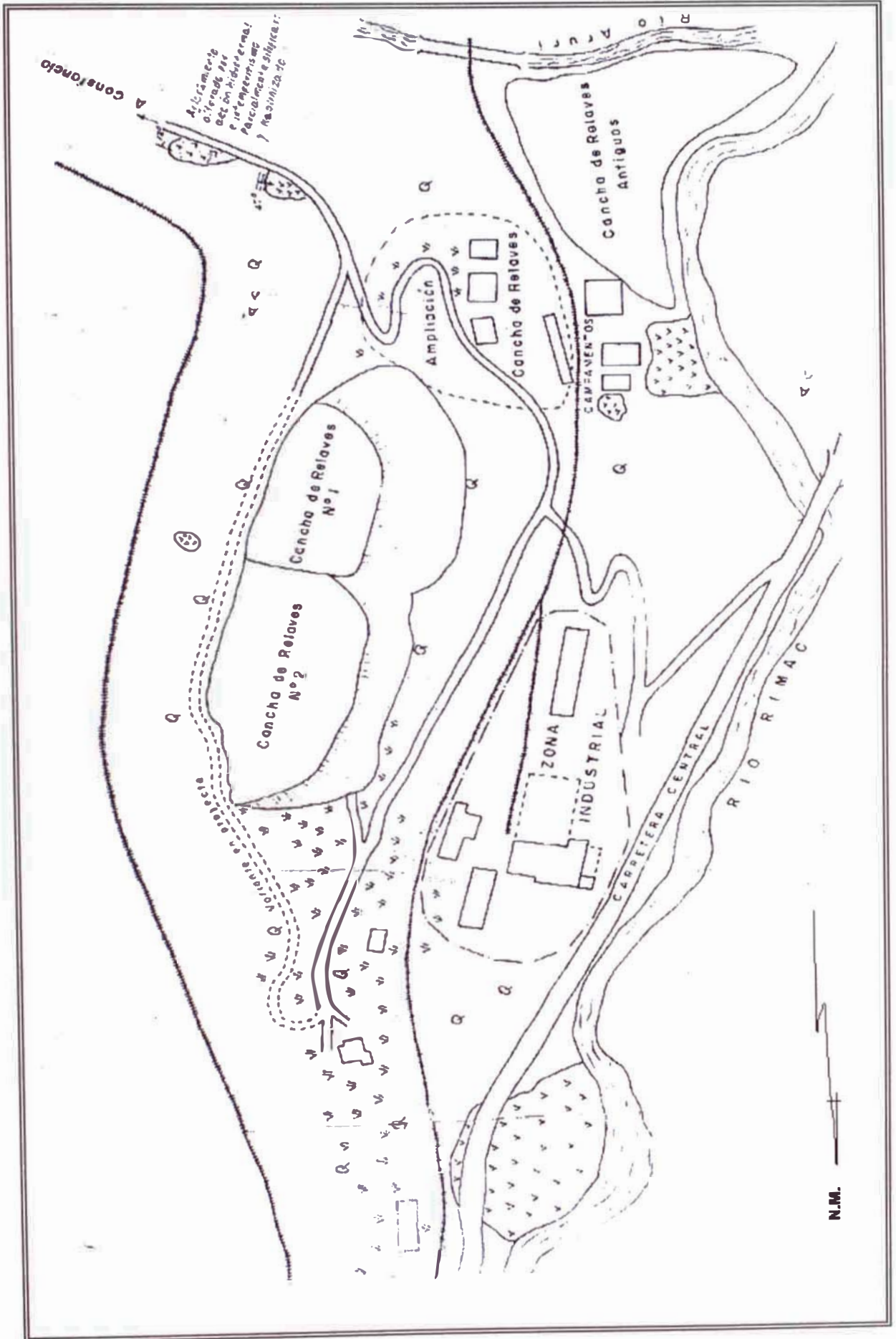
relavera "Triana", es decir que se procede a la ampliación de dicha relavera. **Ver Croquis N°1.**

Se planifica para una segunda etapa, la construcción de una nueva cancha de relaves en la zona de Mayoc, la que constituye el actual **Depósito de Relaves Mayoc**. Este nuevo depósito está emplazado sobre terrenos de propiedad de la empresa, en la cuenca del río Rímac, sobre una terraza plana con ligera pendiente y próxima a poblados con importante ocupación en actividades de agricultura y pastoreo.

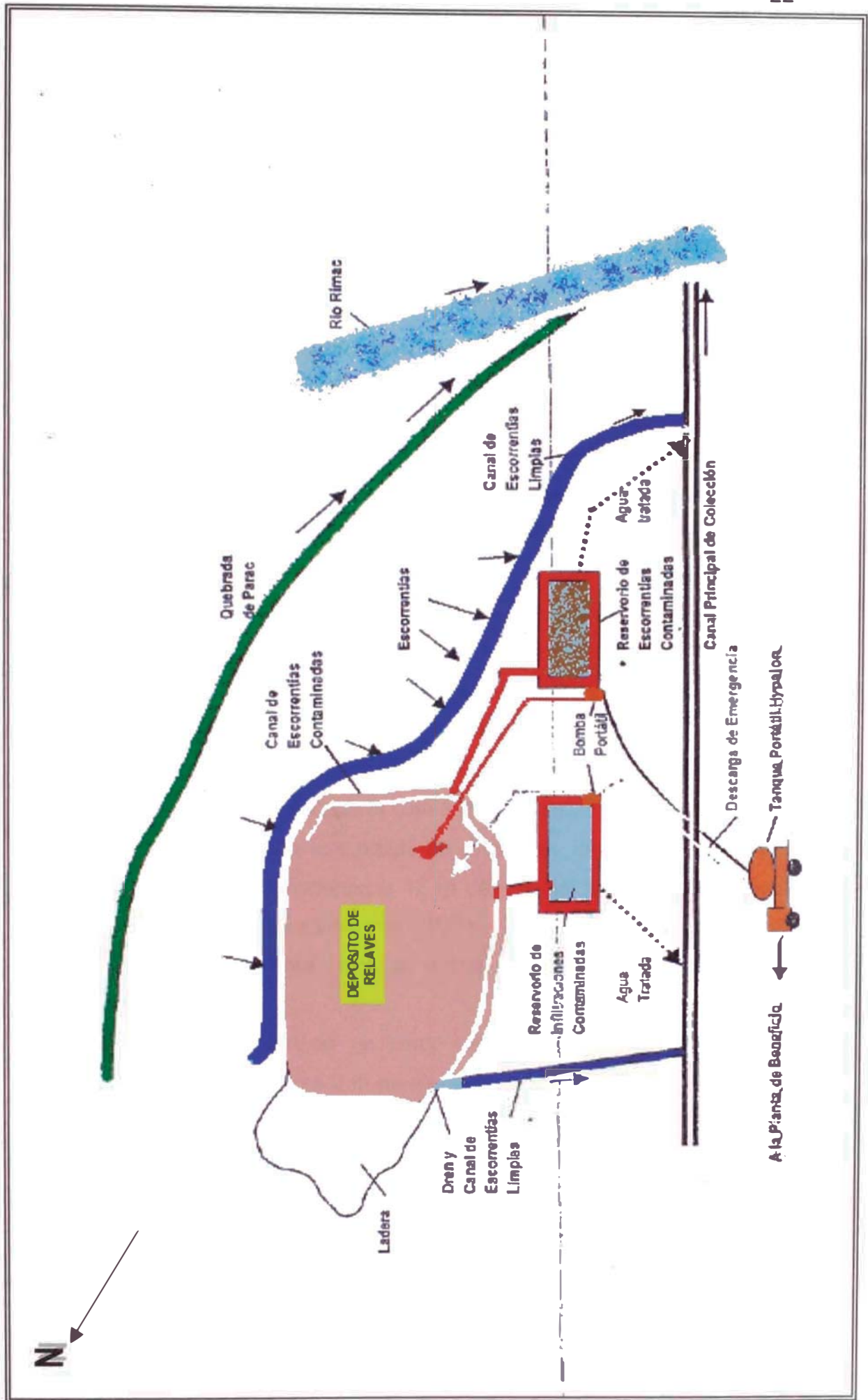
El depósito cuenta con instalaciones auxiliares como es la poza de recolección de aguas de infiltración, provenientes de los propios relaves almacenados. Poza de recolección de aguas conducidas por los canales de derivación, asimismo cuenta con un canal de coronación y derivación para controlar las aguas de escorrentías provenientes de la pequeña quebrada de Mayoc ubicada cerca al depósito. **Ver Croquis N°2.**

El depósito se encuentra impermeabilizado con el empleo de una geomembrana de dos milímetros de espesor. El material que llega al depósito inmediatamente es compactado en lechos de 30 centímetros. El material compactado a su vez forma un lecho de impermeabilización de modo de inhibir posibles infiltraciones al interior del depósito. Por otro lado con fines de proteger la estabilidad del depósito, en el interior se cuenta con filtros drenes que garanticen que el depósito permanezca seco. (1)

Croquis N°1. Instalaciones de la planta Tamboraque



Croquis N°2. Manejo de efluentes de la relavera en condiciones normales y de emergencia



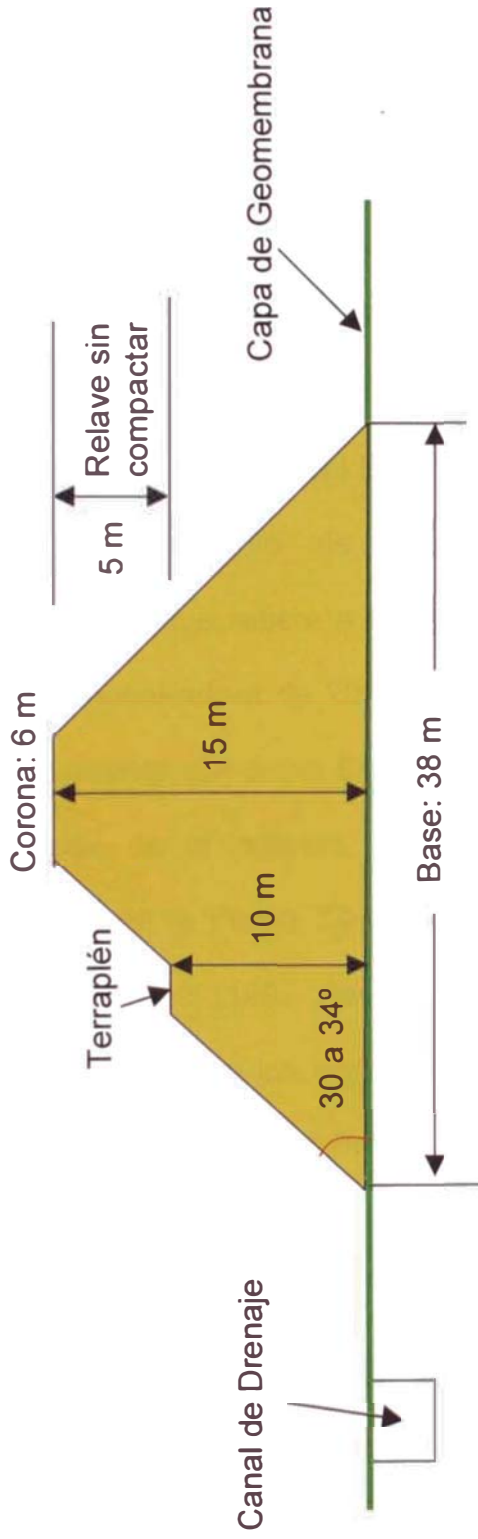
El talud correspondiente al contorno del depósito tiene una relación de 2:1, con crecimiento aguas arriba. Es importante señalar que una vez constituido el talud se procede a colocar una cubierta de tierra orgánica y luego se vegeta esta área.

El material depositado debe estar fuertemente compactado y con la suficiente humedad que no de lugar a la producción de polvos. (1)

Estado actual del depósito.- sobre la base de los trabajos ejecutados siguiendo el diseño propuesto en los Estudios, a la fecha, el estado actual del depósito de relaves de Mayoc es el siguiente:

- * Hay depositados 24 097 m³ de relaves compactados y 13 000 m³ de relaves sobrepuestos y conformados.
- * Los trabajos de instalación de los drenajes proyectados y las cunetas perimetrales necesarias han sido concluidos.
- * Se ha instalado la geomembrana de HDPE en la base del terraplén y en las laderas hasta la cota 3 015 msnm.
- * Se cuenta con dos pozas de retención, una para escorrentías y otra para infiltraciones a 12 m del pie del talud sur del terraplén. Ambas construidas con HDPE que permiten la recolección, monitoreo y tratamiento de dichos efluentes antes de su descarga al río Rímac.
- * Se ha construido un cerco perimétrico, de malla metálica de aproximadamente 2 m de altura. Además de ello, se ha construido un puente carrozable sobre la quebrada aledaña al depósito y una trocha también carrozable paralela al lado Este del depósito para facilitar el tránsito de personas, vehículos y animales. También se han instalado 2 puertas de malla metálica, una en el lado norte y otra en el lado sur, que pueden dar acceso a terceros. La puerta del lado sur es el acceso normal y cuenta con una caseta de vigilancia. **Ver Croquis N°3.** (3)

Croquis N°3. Dimensiones del depósito de relaves Mayoc



Altura total de la presa	: 15 m
Altura hasta el terraplén	: 10 m
Longitud total del Depósito	: 130 m
Densidad húmeda relave	: 2,065 g/cm ³
Densidad seca relave	: 1,735 g/cm ³
Volumen total del Depósito	: 42 900 m ³
Peso total del Depósito	: 88 600 TMH
	74 400 TMS

CAPÍTULO II

INFORMACIÓN RECOPIADA EN MATERIA DE SALUD Y AMBIENTE

2.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

En 1996, en cumplimiento de la normatividad ambiental vigente del Sector Energía y Minas del Estado Peruano, Minera Lizandro Proaño SA presenta el Estudio de Impacto Ambiental para el “Proyecto Tamboraque” que refiere a la ampliación de la capacidad de la mina y planta concentradora de 200 TM/día a 600 TM/día, el que es aprobado posteriormente. En dicho Estudio, el proyecto Tamboraque considera la ampliación de la relavera Triana para la deposición de los relaves generados en la Planta Concentradora Tamboraque, estimando en dos años su vida útil (1997-1999) e indicando el desarrollo del depósito de relaves Mayoc para los siguientes ocho años (1999-2006). Kilborn Perú SA desarrolla en 1997 el Proyecto del depósito de relaves compactados en Mayoc.

El fundo Glorieta de Mayoc, de 6,12 ha, en donde se ubica el Depósito de Relaves Mayoc es adquirido por Minera Lizandro Proaño SA de Centromín Perú SA con fecha 18.08.97.

Así se tiene la siguiente secuencia cronológica de operación de la Relavera Mayoc y de sus Inspecciones Evaluativas Ambientales:

- Agosto-1998.- La Dirección General de Minería (DGM) del Ministerio de Energía y Minas (MEM) autoriza la construcción y acondicionamiento del depósito de relaves Mayoc de la planta de beneficio Tamboraque.
- Diciembre-1998.- Inicio de almacenamiento de relaves.
- Mayo-1999.- Denuncia del Municipio de San Mateo sobre la base de la inspección de la empresa de auditoría e inspectoría (EAI) M&S Especialistas Ambientales EIRL.
- Junio, Julio-1999.- La Dirección General de Asuntos Ambientales y la Dirección de Promoción Minera de la DGM recomiendan que se paralizen las operaciones de la Planta Concentradora y de la Relavera. Muestreo de aguas y efluentes por SEDAPAL.
- Julio, Agosto, Noviembre-1999.- Se realizan verificaciones e inspecciones ambientales a cargo de las EAI Consultcont SAC y EQUAS SA, esta última señala al depósito de relaves como fuente de contaminación, la DGM presenta plazos de cumplimiento de recomendaciones a la Empresa Minera.
- Marzo-2000.- Consultcont presenta informe de verificación de cumplimiento de recomendaciones, reiterando que los materiales depositados en la relavera no son fuente de contaminación.
- Julio-2000.- Inspección especial de verificación de cumplimiento de normas ambientales por SGS, donde se señala que la Empresa Minera cumple con los estándares de efluentes líquidos y calidad de aire.

- Noviembre-2000.- La DGM emite informe de aprobación de la reducción del área de la relavera de 4,1 a 3,9 ha y la ampliación de la Planta Concentradora de 21 a 27,9 ha. Mediante RD 170-2000-EM/DGM, autoriza el funcionamiento de la Planta de Beneficio a 600TM/día y el funcionamiento de la relavera.
- Enero-2001.- Estudio de evaluación de riesgos en la población de San Mateo de Huanchor a cargo de DIGESA revela que la población de la zona muestra signos de contaminación por elementos como As, Pb y Hg. Marcha de protesta de pobladores de San Mateo de Huanchor, se solicita el cese de operaciones, cierre definitivo de la relavera Mayoc y traslado de relaves a los tajos de la mina Coricancha, en calidad de relleno.

Paralización de las operaciones en planta Tamboraque y relavera Mayoc por decisión de la Empresa Minera.
- Febrero-2001.- Inspección especial de verificación de las condiciones ambientales del depósito de relaves Mayoc a cargo de la EAI D&E Desarrollo y Ecología SAC, concluye que en la constitución de la relavera no se han seguido las especificaciones técnicas convirtiéndose en un foco potencial de contaminación.

MEM ordena paralización de operaciones mineras de la concentradora y depósito de relaves Mayoc.
- Setiembre-2002.- Estudio de Impacto Ambiental del Depósito de Relaves Aruri y Estudio de Impacto Ambiental para el Traslado y Disposición Final del Relave de Mayoc.

2.2 ESTÁNDARES DE COMPARACIÓN

Las determinaciones o evaluaciones de contaminantes ambientales se comparan contra valores estándares referenciales a fin de determinar si dichos contaminantes constituyen un riesgo para el ambiente y la salud. En el Perú, el sector económico que ha iniciado este tipo de regulación es el de Energía y Minas, que desde 1992 viene normando las actividades energéticas y minero-metalúrgicas en temas ambientales, siendo particularmente resaltable la implementación y fiscalización de los niveles máximos permisibles de elementos y compuestos presentes en efluentes y emisiones gaseosas. Ver **Tabla N°4 y Anexo N°3**.

Con la promulgación de la Ley N° 17752 el 12 de diciembre de 1969, Ley General de Aguas, el estado peruano formula una política general de desarrollo y utilización del recurso agua. Ver **Tabla N°3 y Anexo N°2**.

Así también, el 24 de junio del 2001 se aprueba el "Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire". Ver **Tabla N°5 y Anexo N°1**.

Finalmente se ha convenido que en las evaluaciones o estudios de la contaminación de un elemento que no se tiene regulado por la normatividad nacional es válido usar estándares internacionales para la respectiva comparación. Ver **Tablas N°6, N°7, N°8 y Anexo N°4**.

2.2.1 Estándares Nacionales

DL N° 17752: Ley General de Aguas.- Coordina lineamientos de acción intersectoriales, donde los ministerios deben contar obligatoriamente con la aprobación de la autoridad sanitaria, la que

establecerá, previo análisis de las aguas, los usos a que puedan ser destinados, determinando seis clases de aguas con valores límites para cada uso: (12.12.69)

I. Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.

II. Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración aprobados por el Ministerio de Salud.

III. Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.

IV. Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).

V. Aguas de zona de pesca de mariscos bivalvos.

VI. Aguas de zona de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial.

Tabla N°3. Valores límites de aguas según el uso

Denominación	Cursos de Agua						Unidades expresadas
	I	II	III	IV	V	VI	
Arsénico	0,10	0,10	0,20	1,00	0,01	0,05	mg/L
Sólidos Flotantes	0,00	0,00	0,00	Peq.Cant.	Moder.	--	
Sólidos Suspendidos	--	--	--	--	--	--	mg/L

Fuente: DL N° 17752

RM N°315-96-EM/VMM.- Niveles máximos permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas. (19.07.96)

**Tabla N°4. Niveles máximos permisibles de calidad de aire
(Anexo N°3 de la RM)**

Parámetro	Concentración Media Aritmética Diaria $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)	Concentración Media Aritmética Anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)	Concentración Media Geométrica Anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)
Anhidrido Sulfuroso	572 (0,2)	172 (0,06)	--
Partículas en Suspensión	350*	--	150
Plomo	--	0,5	--
Arsénico	6	--	--

Fuente: RM N°315-96-EM/MMM

(*) No debe ser excedido más de una vez al año

Además deberá considerarse:

- Concentración Mensual de plomo = $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Concentración de arsénico en 30 minutos = $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ *

DS N°074-2001-PCM.- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Aire. (24.06.2001)

**Tabla N°5. Estándares nacionales de calidad ambiental de aire
(Anexo 1 del DS)**

Contaminantes	Período	Forma del Estándar		Método de Análisis ¹
		Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Formato	
PM10	Anual	50	Media Aritmética Anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	24 horas	150	NE más de 3 veces/año	
Plomo	Anual	--	--	Método para PM10 (Espectrofotometría de Absorción Atómica)
	Mensual	1,5	NE más de 4 veces/año	

Fuente: DS N°074-2001-PCM

NE: No Exceder

1: O método equivalente aprobado

2.2.2 Estándares internacionales y extranjeros referenciales

Estándares Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (NAAQS).- La Oficina de Estándares y Planeamiento de la Calidad

de Aire de la EPA ha establecido los Estándares Nacionales de Calidad de Aire Ambiental para seis contaminantes principales.

Tabla N°6. Estándares nacionales de calidad de aire ambiental (USEPA)

Sustancia	Concentración Permitida en el Ambiente
Partículas Totales Suspendidas (PTS)	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual
	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio en 24 horas
Partículas Finas (PM10)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio anual
	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio en 24 horas

Fuente: NAAQS

Decreto N°2.225 del 23.04.92.- Normas sobre Control de la Contaminación Atmosférica de la República de Venezuela.

Tabla N°7. Límites máximos de contaminantes en el aire (Venezuela)

Contaminante	Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Periodo de Medición: 24 horas	Porcentaje excedencia en lapso de muestreo
Partículas Totales Suspendidas	75	50%
	150	5%
	200	2%
	260	0,5%

Fuente: Decreto N°2.225 - Venezuela

Las concentraciones de los contaminantes se calcularán para condiciones de 1 atmósfera y 298 K.

Reglamento de Ontario 308 (1986).- Normas Propuestas de Calidad de Aire Ambiental.

Tabla N°8. Normas propuestas de calidad de aire ambiental (Ontario)

Nombre del Contaminante	Estándar de Aire Ambiental ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Tiempo Promedio: 24 horas
Arsénico en forma libre y combinada	0,3
Partículas Suspendidas (partículas de menos de 44 micrones en tamaño)	120, en 24 horas
	60, en 1 año (media geométrica)

Fuente: Reglamento de Ontario 308

2.3 REGISTRO DE MONITOREOS DE AGUA, AIRE Y SUELO DE LA ZONA EN ESTUDIO

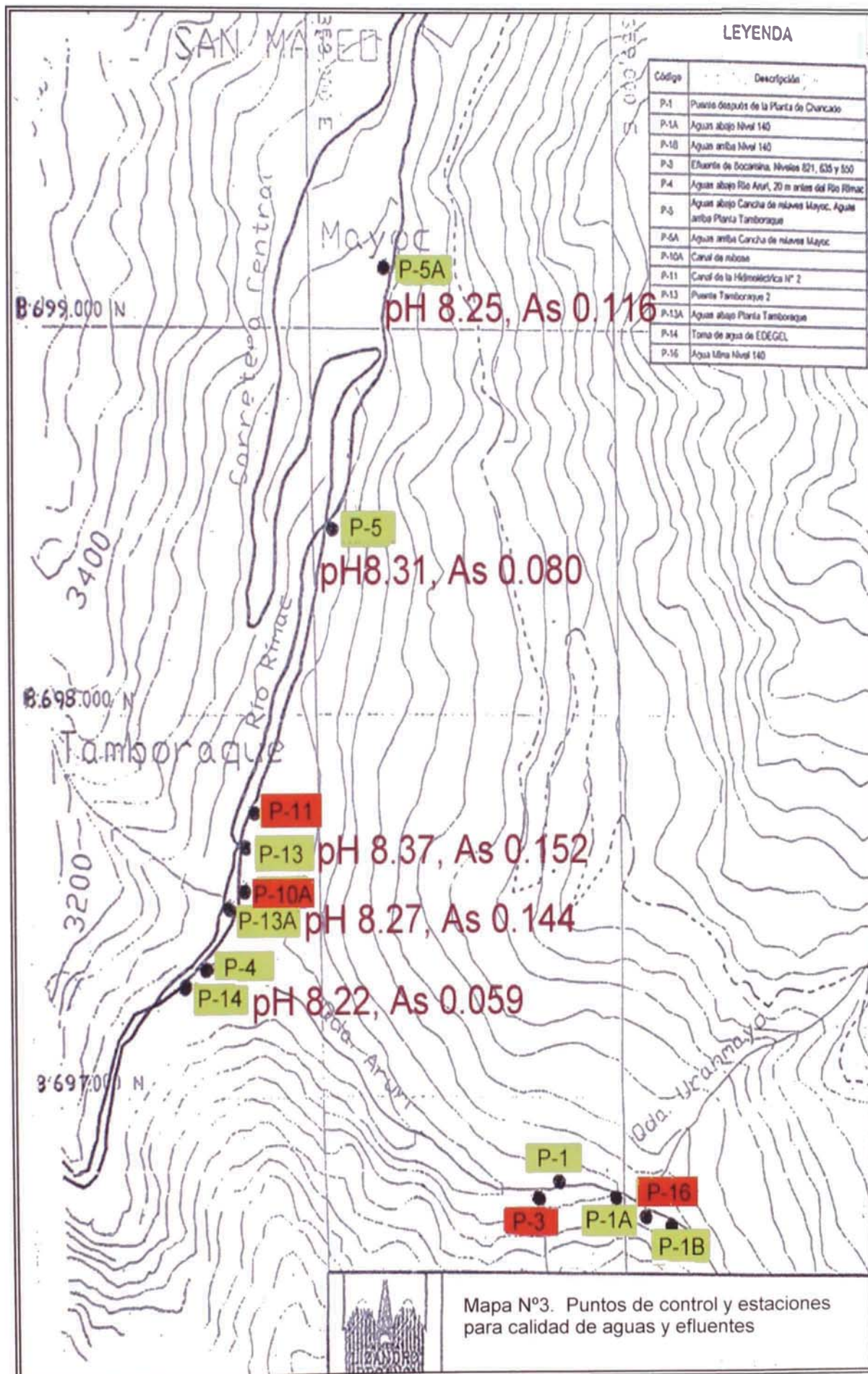
2.3.1 Registros de monitoreos de aguas

A partir de diciembre de 1998, la UP Tamboraque de Minera Lizandro Proaño SA realiza monitoreos mensuales de efluentes líquidos y cuerpos de agua, en la **Tabla N°9** y **Mapa N°3** se describen y señalan los puntos de control respectivamente, ubicados en el río Rímac, indicándose con amarillo los controles de calidad de aguas y con rojo los controles de emisiones de efluentes líquidos.

Tabla N°9. Descripción de puntos de control de aguas relacionados con el estudio

Código	Descripción	Coordenadas UTM	
		Norte	Este
P-5A	Aguas arriba de la cancha de relaves Mayoc	8 699 156	35 8268
P-5	Aguas abajo de la cancha de relaves Mayoc y aguas arriba de la Planta Tamboraque	8 698 493	358 042
P-13	Puente Tamboraque N°2	8 697 662	357 725
P-13A	Aguas abajo de la Planta Tamboraque	8 697 494	357 676
P-14	Toma de agua de EDEGEL, después de la confluencia con el río Aruri	8 697 289	357 556

Fuente: Sistema de Información Ambiental del Ministerio de Energía y Minas



En la **Tabla N°10** se muestran los resultados de monitoreos de aguas, desde diciembre de 1998 hasta junio de 2000 realizados a cargo de la UP Tamboraque. Así también los resultados obtenidos por la EAI SINMA, contratada por la Empresa Minera, y los de DIGESA, EAI EQUAS, EAI CONSULTCONT y SGS a cargo del Estado.

En general, para los cuatro puntos de muestreo, los valores de pH tienen una tendencia ligeramente básica.

Los resultados de concentraciones de metales presentados por la Empresa Minera muestran incongruencia en su expresión, en algunos casos con valores de As expresados hasta la cuarta decimal y en otros con aproximaciones a la primera.

En las dos evaluaciones realizadas a nombre del Estado se encuentran niveles aceptables de As en los cuatro puntos de control del entorno de la relavera Mayoc, notándose una mayor presencia del elemento en las proximidades de la planta Tamboraque.

Además, se observa discordancia entre los reportes de EQUAS y SGS para los puntos de control influenciados por la Planta. Esta incongruencia se relacionaría directamente con la concentración de sólidos en suspensión (TSS). EQUAS reporta metales totales y SGS metales disueltos; entonces la carga metálica se encontraría en el material particulado de las aguas, llegándose a superar ampliamente el nivel permisible.

2.3.2 Registros meteorológicos

Se cuenta con registros meteorológicos de las estaciones de Matucana, San José de Parac y San Mateo. Se presentan además, los registros meteorológicos correspondientes a un día de septiembre de 1999, a cargo de EQUAS SA y de otro del 5-6 de julio del 2000 a cargo de SGS. A continuación se tiene la **Tabla N°11** en la que se resume la serie de datos presentados en el **Anexo N°5**.

Tabla N°11. Resumen de datos meteorológicos

Parámetro	Unidad	Fuente	Período	Valor Promedio
Temperatura	°C	ONERN (Matucana)	1964-1971	15,3
		SENAMHI (Matucana)	1980-1989	15,0
			1986-1995	15,1
		EQUAS	09.99	13,6
		SGS	05-06.07.2000	12,2
Precipitación	mm	ONERN (Matucana)	1964-1971	275,9
		ONERN (SJ Parac)	1966-1969	431,0
		SENAMHI (SJ Parac)	1980-1992	591,7
			1986-1995	530,0
Evaporación	mm	ONERN (Matucana)	1964-1971	1 889,8
		SENAMHI (Matucana)	1983-1985	1 109,0
Humedad Relativa	%	ONERN (Matucana)	1964-1971	61
		SENAMHI (Matucana)	1981-1985	69
		EQUAS	09.99	36
		SGS	05-06.07.2000	54
Vientos: Dirección Velocidad	(km/h)	ONERN (Matucana)	1964-1971	SW
				13,4
		SENAMHI (Matucana)	1994	SSW
				6
		EQUAS	09.99	SW
				8,66
		SGS	05-06.07.2000	SW-S
		6,5		

Los datos obtenidos son típicos de la región andina, pues el balance precipitación- evaporación así como la humedad relativa y temperatura confirman la característica de clima frío seco. La evaporación supera a la precipitación en el año incluyendo los meses de lluvia (enero a marzo).

La dirección predominante del viento en la zona es del SW, con velocidades bajas.

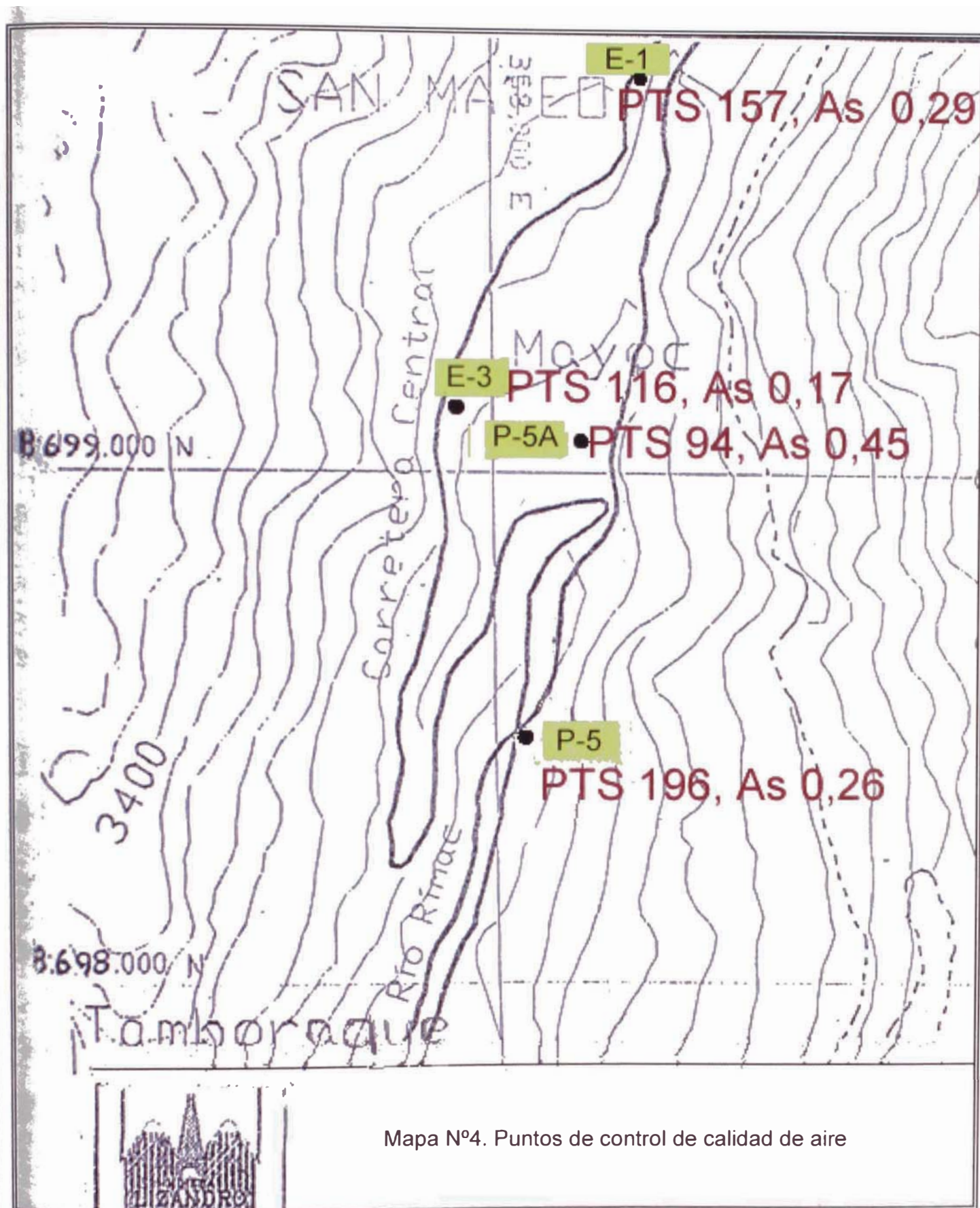
2.3.3 Registros de monitoreos de aire

La UP Tamboraque evalúa sus características de calidad de aire desde marzo de 1999, así también las empresas Consultcont, EQUAS SA y DIGESA han realizado evaluaciones a nombre del Estado. En la **Tabla N°12** y **Mapa N°4** se muestran la descripción y distribución de los puntos de control respectivamente y en la **Tabla N°13** los resultados de tales controles.

Tabla N°12. Descripción de puntos de control de aire relacionados con el estudio

Código	Descripción	Coordenadas UTM	
		Norte	Este
P-5	Vivienda de Gerardo Mendoza Romero próxima al Puente Tamboraque N°3: BARLOVENTO	8 698 737	358 087
P-5A	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón-Mayoc	8 699 116	358 124
E-3	Vivienda de Carmen Hidalgo-Daza	8 699 313	357 980
E-1	Centro de Salud de San Mateo. Av. Leguía s/n primera cuadra.	8 700 205	358 540

Fuente: Sistema de Información Ambiental del Ministerio de Energía y Minas



Mapa N°4. Puntos de control de calidad de aire

En general las concentraciones de partículas totales en suspensión (PTS), se encuentran próximas al límite permisible referencial establecido por el Estado Peruano y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), registrándose en algunas oportunidades valores que sobrepasan.

Comportamiento análogo se tiene para el material particulado fino (PM10).

Se aprecia contenido metálico (Pb y As) en el material particulado en niveles considerables.

No se aprecia la influencia directa de la presencia de la relavera en los valores de sotavento (Mayoc, Daza y San Mateo), contra barlovento (Tamboraque).

En el punto de control, con aparente mayor influencia de la relavera, se tiene concentraciones de Pb muy próximos a los niveles permisibles y valores muy considerables de As, aunque este último tenga un valor límite bastante más alto en la norma sectorial del país.

2.3.4 Registros de muestreos de suelos

Como parte de las evaluaciones de Consultcont se tomaron cinco (05) muestras de suelos en los alrededores del fundo Glorieta de Mayoc y una (01) en la zona del poblado Tamboraque; a fin de establecer la concentración de metales en ellos. Las muestras

corresponden a excavaciones de 30 cm. En la **Tabla N°14** se muestran los resultados de los análisis químicos:

Tabla N°14. Resultados de muestreo de suelos

Muestra	pH*	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (%)
1-T	7,9	0,06	0,19	0,59	4,77	0,03
2-T	8,0	0,04	0,13	0,39	4,24	0,03
3-T	7,9	0,03	0,07	0,22	4,52	0,02
4-T	7,8	0,03	0,09	0,25	3,84	0,03
5-T	8,1	0,03	0,1	0,26	4,88	0,03
6-T	8,1	0,03	0,1	0,21	4,55	0,12

Valor referencial de suelos agrícolas**

0,002 0,040*** 0,002

* Pasta preparada con L/S : 1.0

** American Society of Agronomy, 1982

*** Suelo minero rehabilitado para uso agrícola

Fuente: Informe de Inspección Ambiental de EAI Consulcont SA, 1999.

Los resultados indican que la generalidad de suelos de la zona cultivada aguas arriba del depósito de relaves, muestras 1-T al 5-T, presentan una concentración anormal por exceso de metales como Pb, Zn y As.

La muestra de suelo 6-T corresponde al suelo del entorno de la Posta Médica de Tamboraque y reporta una concentración de As, cuatro veces mayor que las muestras de Mayoc, por lo que no se podría relacionar directamente la presencia de niveles de arsénico considerables con las actividades en el depósito de relaves Mayoc. Valores, como el reportado para la muestra 6-T, indican suelos con contaminación por su proximidad a depósitos minerales y/o viejos

hornos de tostación o chimeneas de fundición o en general a actividad de beneficio de minerales ricos en arsénico.

2.3.5 Registros de caracterización de relaves

El tratamiento integral de los minerales sulfurados en la planta Tamboraque genera tres tipos de relaves y un concentrado de piritas con mínimo contenido valioso, que finalmente también se dirige al mismo almacenamiento.

Las características de los relaves se presentan en las **Tablas N°15** y **N°16**.

Tabla N°15. Características de la mezcla de relaves a ser compactados (EQUAS)

N° Malla	%	Parámetros	Unidades	Resultado
		pH a 20°C		7,04
+ 20	0,74	Humedad	%	7,48
+ 50	2,90	Cianuro Total*	mg/kg	7,28
+ 80	9,07	Arsénico	mg/kg	42 062,5
+ 100	5,33	Plomo	mg/kg	616,25
+ 140	13,33	Zinc	mg/kg	17,6
+ 200	10,54	Cadmio	mg/kg	3 418,75
- 200	58,09	Cobre	mg/kg	556,25
		Hierro	mg/kg	141 562
		Antimonio	mg/kg	138,125

Fuente: Informe de inspección ambiental de EAI Equas SA, 1999.

Del análisis granulométrico se tiene que las partículas de relave principalmente tienen un tamaño menor a la correspondiente a la malla 200, presente en un 60%. Del análisis químico, notamos que el contenido de As en el relave llega a 4,2%, constituyéndose en una de la concentración más elevada después del Fe.

Tabla N°16. Características de relaves almacenados (Fuente: MLPSA)

PRODUCTO	SÓLIDOS TM/día	G.E.	LÍQUIDOS m ³ /día	pH	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		ANÁLISIS QUÍMICO	
RELAVE GENERAL (1)	422	2,77	2,556	6,6	m+ 70	2,9	% Cu	0,080
					m +100	8,3	%Pb	0,050
					m+200	26,8	%Zn	0,450
					m+325	24,4	%Fe	2,000
					m+400	7,1	%As	0,400
					m-400	30,5	Oz/TM Ag	--
					m-200	62,0	Oz/TM Au	--
							%Insolub.	93,00
RESIDUO NEUTRALIZADO (2)	115	2,7	1,290	7,4	m+70	4,1	% Cu	--
					m+100	3,3	%Pb	--
					m+200	2,4	%Zn	--
					m+325	3,2	%Fe(Ox)	16,800
					m+400	1,6	%As	9,700
					m-400	85,4	Oz/TM Ag	--
					m-200	90,0	Oz/TM Au	--
							%Insolub.	--
RESIDUO CIANURADO (3)	43	2,80	172,8	11,0	m+70	--	% Cu	Trazas
					m+100	0,2	%Pb	Trazas
					m+200	1,5	%Zn	Trazas
					m+325	13,9	%Fe	10.800
					m+400	10,6	%As	5,400
					m-400	73,8	Oz/TM Ag	1,2
					m-200	98,3	Oz/TM Au	0,096
							%Insolub.	--
CONCENTRADO DE PIRITAS (4)	74	5,77	158,4	8,4	m+70	0,1	% Cu	0,540
					m+100	3,2	%Pb	0,350
					m+200	34,8	%Zn	0,610
					m+325	21,5	%Fe (Py)	43,300
					m+400	7,0	%As	1,900
					m-400	36,6	Oz/TM Ag	4,500
					m-200	65,1	Oz/TM Au	0,145
							%Insolub,	6,000
MEZCLA DE RELAVES (1)+(2)+(3)+(4)	654	2,90	4 177,2	7,0	m+70	2,5	% Cu	0,100
					m+100	6,5	%Pb	0,100
					m+200	23,7	%Zn	0,390
					m+325	21,3	%Fe	6,500
					m+400	6,8	%As	0,530
					m-400	39,2	Oz/TM Ag	--
					m-200	67,3	Oz/TM Au	--
							%Insolub,	85,000

Los análisis realizados por la Empresa Minera reportan una granulometría con importantes cantidades tanto en malla +200 y – 200, mientras que el contenido de As es reportado como considerable pero moderado,

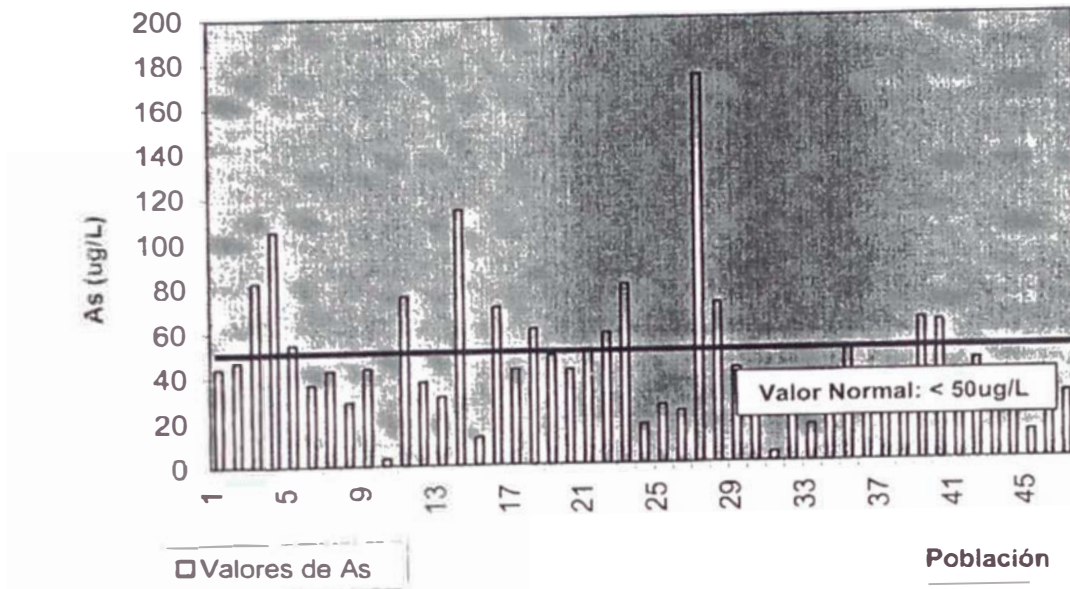
2.3.6 Resultados de la evaluación de riesgos por contaminación minera en San Mateo de Huanchor realizado por DIGESA

Se analizaron elementos metálicos en muestras biológicas en 51 personas de la localidad de San Mateo de Huanchor, para determinar la presencia de plomo en sangre, arsénico y mercurio en orina,

Para el caso de arsénico en orina, se realizó la toma de muestras en 47 personas; resultando que 8 personas presentan valores muy por debajo de los Límites Máximos Permisibles, 25 con contenidos próximos a los límites y 14 que los superan, Ver **Diagrama N°2** y **Anexo N°6**.

DIGESA ha considerado el Límite Máximo Permissible como 50 µg/L de orina de 24 horas, para personas no expuestas ocupacionalmente. El método seguido en la determinación de arsénico en orina se presenta en **Anexo N°6**,

**Diagrama N°2. Arsénico en orina
localidad de San Mateo de Huanchor**



Fuente: DIGESA, Informe de riesgos de salud en San Mateo de Huanchor, 2000.

CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS DEL ARSÉNICO

El entendimiento de la ocurrencia natural, la química y las formas minerales del arsénico en el medio ambiente superficial es de importancia primordial en el estudio de las fuentes y medios que contribuyen a la exposición humana. El arsénico es un elemento metaloide, que se encuentra en el Grupo Vb de la Tabla Periódica, pero es muy usual referirlo incorrectamente como un metal. El arsénico se encuentra usualmente presente en pequeñas cantidades en todas las rocas, suelos, polvo, agua, aire y tejidos biológicos.

3.1 GEOQUÍMICA, HIDROGEOQUÍMICA Y QUÍMICA DEL SUELO (5)

Como parte de revisiones recientes de la geoquímica del arsénico se ha señalado que es el principal constituyente de más de 200 especies minerales, de las cuales aproximadamente el 60% son arsenatos, 20% sulfuros y sulfosales, el restante 20% incluye arseniuros, arsenitos, óxidos, silicatos y arsénico elemental. Algunos minerales de arsénico comunes se listan a continuación:

Tabla N°17. Algunos minerales comunes del arsénico

Tipo de Compuesto	Nombre de Mineral	Fórmula
Sulfuros	Arsenopirita (Mispíquel) Oropimente Realgar	FeAsS As ₂ S ₃ AsS
Sulfosales	Tennantita Enargita	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃ Cu ₃ AsS ₄
Arsenatos	Escoriodita Mimetita	FeAsO ₄ .2H ₂ O Pb ₅ (AsO ₄) ₃ Cl
Arsenitos	Trippkeita	CuAs ₂ O ₄
Arseniuros	Lollingita	FeAs ₂
Oxidos	Arsenolita	As ₂ O ₃

Fuente: I.Thornton y M. Farago, The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000.

El arsénico está presente en muchos depósitos minerales y en particular en aquellos que contienen sulfuros minerales, es común en pirita de hierro, galena, calcopirita, y menos común en esfalerita. Es usado como un indicador de mineralización de oro en las evaluaciones geoquímicas, siendo el mineral de arsénico más común la arsenopirita.

La concentración promedio de arsénico en rocas ígneas y sedimentarias es 2 mg/kg, y en la mayoría de las rocas varía de 0,5 a 2,5 mg/kg, pero se han encontrado concentraciones más elevadas en sedimentos arcillosos finos y fosforitas.

El arsénico está concentrado en algunos sedimentos marinos reductores, los cuales pueden contener hasta 3 000 mg/kg. Puede ser coprecipitado con hidróxidos de hierro y sulfuros en rocas sedimentarias. Depósitos de hierro, mineral de hierro sedimentario, y nódulos de manganeso son ricos en arsénico.

La concentración de arsénico en aguas frescas no contaminadas típicamente oscila de 1-10 µg/L, elevándose a 100-5000 µg/L en áreas

de mineralización de sulfuros y áreas mineras. A potenciales redox moderados o altos, el arsénico puede ser estabilizado como una serie de oxianiones pentavalentes (arsenatos), H_3AsO_4 , $\text{H}_2\text{AsO}_4^{-1}$, HAsO_4^{-2} y AsO_4^{-3} . Sin embargo, bajo las condiciones más reductoras (ácida y ligeramente alcalinas), predominan las especies de arsenito trivalente (H_3AsO_3). La retención de arsénico en solución está asociada a la coprecipitación con elementos tales como Fe, Ba, Co, Ni, Pb, y Zn.

Compuestos complejos de arsénico orgánico tales como sales de tetrametilarsonio, arsenocolina, arsenobetaina, óxidos de dimetilarsina, y lípidos arsenocontenedores han sido identificados en el ambiente marino. **Solamente una fracción muy menor del arsénico total en los océanos se mantiene en solución en el agua de mar, pues la mayoría es absorbido en el material particulado.**

Las principales fuentes de arsénico en suelos son los materiales matrices de los cuales son derivados, estos podrían ser el lecho rocoso subyacente o materiales transportados por el viento y el aire. **Cuando las rocas erosionan, el arsénico puede ser movilizado como sales de ácido arsenioso y ácido arsénico.** El arsénico está presente en suelos en concentraciones más altas que aquellas en rocas, los suelos no contaminados contienen 1-40 mg/kg de arsénico, con concentraciones más bajas en suelos arenosos y aquellos derivados de granitos. Concentraciones más grandes son encontradas en suelos aluviales y en suelos orgánicos. Suelos en la proximidad de depósitos de minerales sulfurados pueden contener hasta 8000 mg/kg de arsénico.

Altas concentraciones son también encontradas en suelos y aguas subterráneas afectadas por actividad geotermal.

La tostación de minerales sulfurados de arsénico y la quema de carbón rico en el metaloide libera trióxido de arsénico, el cual puede reaccionar en el aire con óxidos básicos, tales como óxidos de tierras alcalinas, para formar arsenatos, los cuales pueden ser luego depositados sobre los suelos. Por ejemplo, en áreas mineralizadas de Cornwall, concentraciones de arsénico en suelos superficiales llegan hasta 1 500 mg/kg, y en la vecindad de viejos hornos de tostación y chimeneas de fundición pueden oscilar desde 0,1 a 1,0% o más.

Bajo condiciones oxidantes, en ambientes aeróbicos, los arsenatos (conteniendo arsénico pentavalente) son las especies estables. El arsénico se precipita como arsenato férrico en horizontes de suelo ricos en hierro. Concentraciones elevadas de arsénico (8-40 mg/kg) en suelos de sulfato ácido en Canadá y Nueva Zelanda son asociados con la presencia de pirita, la cual típicamente retiene hasta 0,5% de arsénico a través de la sustitución reticular del sulfuro. La lixiviación del arsénico derivada de la erosión de las tejas piriticas en Alberta-Canadá, han conducido a la acumulación de hasta varios cientos de mg/kg en el subsuelo mediante la adsorción sobre óxidos de hierro secundario. Bauxitas ricas en hierro han sido registradas también (>500mg/kg de As_2O_3). Bajo condiciones reductoras, los arsenitos (conteniendo arsénico trivalente) son los compuestos de arsénico predominante. Sin embargo,

la reducción del arsenato a arsenito es lenta, y los sistemas de suelos pueden no estar en equilibrio.

Los compuestos inorgánicos de arsénico pueden ser metilados por microorganismos, produciendo, bajo condiciones oxidantes, ácido metilarsónico, ácido dimetilarsínico y óxido de trimetilarsina. Bajo condiciones anaeróbicas estos podrían ser reducidos a metilarsinas volátiles y fácilmente oxidadas.

Bajo los rangos de Eh y pH en suelos, el arsénico podría estar presente ya sea como As(V) o como As(III), con actividad microbial causante de metilación, dimetilación y/o cambio de estado de oxidación. Los arsenatos de hierro y aluminio son las fases dominantes en los suelos ácidos y son menos solubles que el arsenato de calcio, la cual es la forma química principal en muchos suelos calcáreos. Minerales sulfurados de arsénico podrían formarse si las especies sulfuradas se encuentran presentes y si el potencial redox es suficientemente bajo. Minerales arcillosos, óxidos de Fe, Mn y Al, y materia orgánica pueden influenciar la sorción, solubilidad y velocidad de oxidación de las especies de arsénico.

3.2 BIOGEOQUÍMICA Y GEOBOTÁNICA

El arsénico es un constituyente de la mayoría de las plantas. El mataloide puede ser fitotóxico y la toxicidad del arsenito es mayor que aquella del arsenato. Es sugerido que el proceso de absorción e incorporación del As es pasivo, y que es trasladado a la mayoría de las

partes de la planta, siendo encontrado mayormente en raíces y hojas antiguas. Niveles de arsénico natural en plantas rara vez exceden 11 $\text{m}\mu\text{g/g}$. Markert (1992) ha construido una tabla mostrando las concentraciones elementales de una "Planta de Referencia" usando sus datos propios y datos publicados de la literatura. No se incluyeron datos de plantas acumuladoras o rechazadoras. La planta de referencia hipotética fue asignada con una concentración de arsénico de 0,1 $\text{m}\mu\text{g/g}$.

El entendimiento del comportamiento del arsénico dentro de las plantas de cosecha es de preocupación, desde que esto provee una entrada del elemento tóxico en la cadena alimenticia. Xu y Thornton (1985) evaluaron 32 jardines en el área de Hayle-Camborne en Cornwall, donde las concentraciones de arsénico en suelo estuvieron en el rango de 144-892 $\mu\text{g/g}$. Ellos determinaron arsénico en lechuga, cebolla, betarraga, zanahoria, arveja y frejol; el contenido de arsénico en vegetales se incrementó con el contenido de arsénico en el suelo pero solamente la lechuga excedió los 11 $\mu\text{g/g}$ (peso en seco). Las relaciones entre los contenidos de arsénico en remolacha, lechuga, cebolla y arveja y entre ambos arsénico total y extraíble en suelo fueron significantes, mostrando que los niveles de arsénico en el tejido comestible se incrementan con el contenido en el suelo. El arsénico en las zanahorias y los frejoles no estaba significativamente relacionado con el contenido del suelo. Concentraciones similares de arsénico fueron encontrados en lechuga y fresas en el área de Tamar Valley donde los valores máximos reportados

fueron 1,41 $\mu\text{g/g}$ y 0,7 $\mu\text{g/g}$ (peso seco) respectivamente, con contenidos de arsénico incrementándose con el arsénico en el suelo. Arroz crecido en suelos contaminados presentaron concentraciones medias de 0,19 $\mu\text{g/g}$ (peso seco) pero las raíces contenían un rango de 936-1182 $\mu\text{g/g}$. Rendimientos de arroz, cebada y alfalfa en campos de algodón, previamente tratados con As, pueden ser reducidos. Estos autores también han sugerido que bajos niveles de fosfatos desplazan al arsénico de las partículas de suelo, lo que incrementa su proceso de absorción e incorporación, así como, su fitotoxicidad, mientras que cantidades más grandes de fosfatos compiten con el arsénico en las superficies de la raíz para disminuir absorción, incorporación y fitotoxicidad.

Las concentraciones de arsénico en plantas pueden también revelar contaminación, para lo que debe considerarse que las concentraciones podrían elevarse si han sido utilizados pesticidas con arsénico.

El arsénico se acumula en *Pseudotsuga mensiesii*, habiendo sido reportado en cenizas de la planta hasta 2 000 - 5 000 $\mu\text{g/g}$. Altas concentraciones de hasta 16 $\mu\text{g/g}$ (peso seco) en dandelion (*Taraxacum officinale*) creciendo alrededor de fundiciones en Bulgaria, han sido registrados. Esta planta ha sido también usada para comparar la contaminación urbana en tres ciudades europeas. Se analizaron muestras de Sofía (Bulgaria), Thessaloniki (Grecia) y Róterdam (Países Bajos), donde se registraron los siguientes valores de arsénico <0,1, 4,87 y 1,5 $\mu\text{g/g}$ (peso seco), respectivamente. La cantidad de arsénico

más elevado en Thessaloniki fue asociado con la contaminación por tráfico. Se ha estudiado la absorción e incorporación de arsénico por gramas, carrizos y ortigas provenientes del estuario Rhine y de aguas cercanas a mina. Algunas gramas mostraron más elevadas concentraciones de As en hojas muertas que en raíces. El crecimiento de carrizos fue más inhibido que el crecimiento de ortiga. El hierro juega un papel clave en la determinación de la movilidad de arsénico en suelos pantanosos salinos y en los procesos de traslado en la planta.

En el sur-oeste de Inglaterra, el enriquecimiento metálico en los suelos es dominado por la mineralización de Sn-Cu-As con contaminación adicional por actividades de minería y fundición, muchas de las cuales fueron muy ineficientes. La planta Armeria marítima Willdenow, la cual ha sido ampliamente reconocida como un indicador de mineralización, fue investigada por su absorción e incorporación de arsénico en tres sitios históricos, las labores Botallack, la mina Levant y la mina Poldice, con un sitio en la costa norte de Cornwall en Portreath como control. Además fueron investigadas, por absorción e incorporación de arsénico, varias plantas colonizantes de las tierras altamente contaminadas. Concentraciones de As en suelo y planta en los cuatro sitios se muestran en la **Tabla N°18** y concentraciones de arsénico en algunas plantas colonizantes del sitio Poldice se muestran en la **Tabla N°19**. Los niveles de arsénico son más altos en el sitio Poldice, reflejando el hecho que Poldice fue básicamente un sitio de minado y fundición de cobre y arsénico, mientras que Botallack y Levant fueron principalmente sitios de

minado de estaño y cobre. Los contenidos de arsénico de muchas de estas plantas fueron más altos que aquellos considerados ser tóxicos y aún las plantas presentaban algunos síntomas de toxicidad. Usando las concentraciones medias en suelos, hojas y raíces en cada sitio, las razones de concentración media de hoja/suelo y raíz/suelo son también mostradas en la **Tabla N°18**.

Tabla N°18. Rangos y promedios de concentraciones de arsénico ($\mu\text{g/g}$) en suelos y en *Armeria marítima* (Am) en materia seca

Sitio		Labores Botallack	Mina Levant	Mina Poldice	Portreath Costero
Tipo		Contaminado	Contaminado	Contaminado	Descontaminado
Suelo	Rango Media n	82,3-617 274 10	178-4540 1 106 8	1 060-74 900 6 713 33	27,3-41,5 33 3
Hojas Am	Rango Media Hoja/suelo	1,13-3,4 2,2 0,008	0,7-32,3 3,0 0,0027	4,1-63,9 18,3 0,0027	0,1
Raíces Am	Rango Media Hoja/suelo Hoja/raíz	7,1-26,4 10,5 0,038 0,21	6,6-171 18,3 0,017 0,16	11,1-454 73,4 0,011 0,25	2,3-3,4 2,8 0,085

Fuente: I.Thornton y M. Farago, The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000

Se han discutido las razones para *Armeria marítima* creciente en un pantano impregnado de cobre, considerando que cuando las razones planta/suelo para cualquier elemento particular eran 0,1, entonces la planta podía ser considerada como excluyente del elemento de sus tejidos. Así, aunque las concentraciones de arsénico puedan ser altas y algo de arsénico sea absorbido e incorporado en las raíces, solamente una proporción de esta se traslada a las hojas, resultando una razón de

concentración hoja/raíz de cerca de 0,2. Este tipo de absorción e incorporación ocurre también en *Calluna vulgaris* en Poldice donde esta razón es 0,34.

Tabla N°19. Concentraciones de As ($\mu\text{g/g}$) en materia seca en algunas plantas colonizantes de tierras contaminadas en el sitio Poldice

Planta	Parte	n	Rango	Media
<i>Calluna vulgaris</i> (brezo)	Altas	25	5,95-370	32
<i>Calluna vulgaris</i> (brezo)	Raíces	25	36,4-153	92,5
<i>Rubus ulmifolius</i> (zarza)	Altas	10	1,35-15,8	4,2
<i>Ulex europaeus</i> (tojo)	Altas	10	1,45-15,4	4,2
<i>Cymbalaria muralis</i> (hiedra)	Altas	5	1,97-10,2	4,5

Fuente: I.Thornton y M. Farago. The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000

Este trabajo ha demostrado que los sitios altamente contaminados con arsénico y otros elementos pueden ser colonizados por plantas indicadoras conocidas y también por otras plantas silvestres. Las plantas pueden absorber e incorporar concentraciones considerables de arsénico en sus partes aéreas pero particularmente en sus raíces.

3.3 QUÍMICA DEL ARSÉNICO

3.3.1 El elemento

Por la posición que ocupa el arsénico en el grupo Vb tiene más características de no-metal que de metal; de aquí que forme más fácilmente aniones que cationes, por lo que la mayoría de las reacciones en medio acuoso son, en realidad, de los arseniatos o de los arsenitos.

Como sus elementos contiguos del sistema periódico (fósforo, antimonio, silicio, selenio, telurio, azufre y estaño) presentan el

fenómeno de alotropia. Se han descrito cuatro formas alotrópicas del arsénico: metálica, gris, parda y amarilla. La más importante es la metálica, llamada también arsénico α . Esta forma es cristalina, de color gris, brillo acerado, quebradiza y conduce bien la electricidad; esta conductividad eléctrica es unas tres veces mayor que la del bismuto y quizás constituye la propiedad metálica más acusada del As. Se sublima a 450 °C, sin fundir, dando vapores amarillos, que condensados bruscamente a baja temperatura, originan la variedad alotrópica amarilla. Este As amarillo, por la acción de la luz, pasa a la forma parda y, finalmente, a la gris. El As metálico arde al aire a 180 °C desprendiendo un olor aliáceo muy característico, que permite reconocer hasta trazas de arsénico. No se disuelve en el agua, pero se altera al aire húmedo oxidándose a As_2O_3 y perdiendo su brillo.

Su estructura electrónica externa es $3d^{10} 4s^2 4p^3$ y en sus compuestos funciona con los grados de oxidación (-III), (III) y (V). El arsénico no forma cationes simples; en todos sus estados de oxidación los compuestos del arsénico tienen enlace covalente. (6)

3.3.2 Propiedades redox

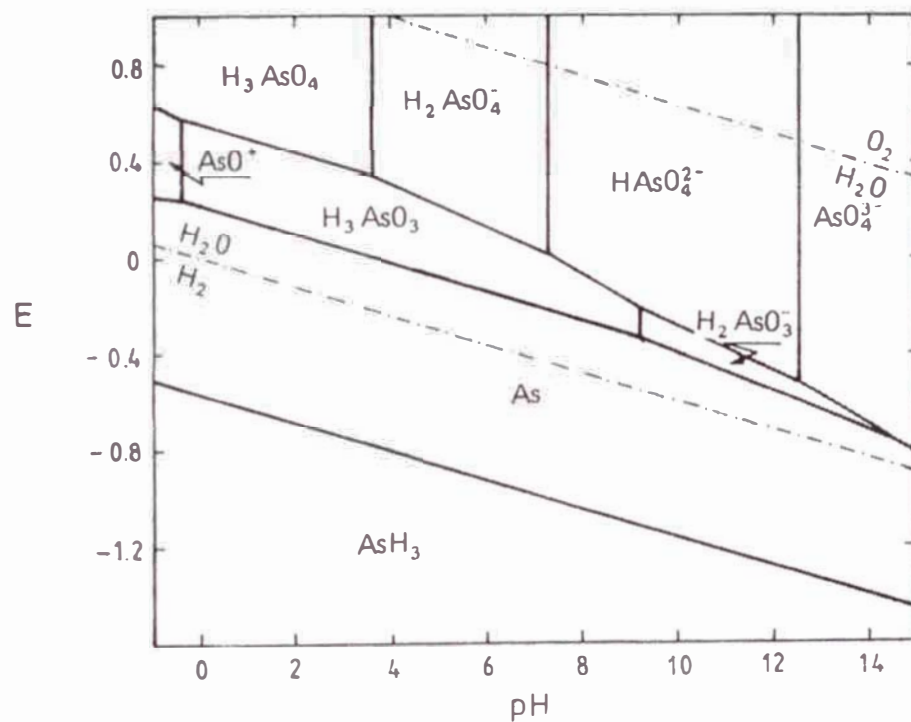
En el **Diagrama N°3** se representa Eh contra pH para el arsénico.

En la concentración a la que está realizado el diagrama (10^{-2} M) no se forma la especie sólida As_2O_3 ni predomina la forma catiónica de arsénico (V), AsO_2^+ .

La especie AsH_3 es muy reductora en todo el margen de pH; solo puede ser obtenida, a partir de estados de oxidación superiores, con reductores fuertes (Zn, Al, etc.).

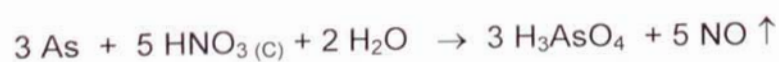


Diagrama N°3. Eh - pH del arsénico. $C = 10^{-2} \text{ M}$.



Fuente: F. Burriel Martí y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992

El sistema As(III)/As presenta un potencial decreciente al aumentar el pH y siempre superior al del sistema $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$, por lo que el elemento no ha de disolverse en los ácidos no oxidantes.



Si el As elemental no es oxidado con facilidad, es lógico que el As(III) sea reducido fácilmente a As; dada la variación del potencial con el pH es evidente que la reducción es más fácil en medios ácidos, medios en los que el potencial del sistema As(III)/As es más elevado.

El sistema As(V)/As(III) presenta un potencial próximo a 0,6V en medio ácido, y del orden de $-0,7$ en medio alcalino: por consiguiente, este sistema se comportará como oxidante en medio ácido y fundamentalmente como reductor en medio neutro o alcalino. (6)

3.3.3 As(-III)

El compuesto más importante, analíticamente, del As (-III) es la arsina, AsH_3 . Es un gas incoloro, muy reductor, de olor aliáceo, que se desprende en la reducción de los compuestos de arsénico por reductores fuertes (Zn, Al, hidrógeno nascente, etc.).

La arsina es muy tóxica; posiblemente sea uno de los gases más venenosos y, desde luego, el más tóxico de los compuestos de arsénico, por lo que hay que tomar las debidas precauciones cuando pueda desprenderse. (6)

3.3.4 As(III)

Este grado de oxidación origina el trióxido, As_2O_3 , los arsenitos y el catión AsO^+ (frecuentemente formulado como As^{3+}), todos ellos de gran interés analítico y toxicológico.

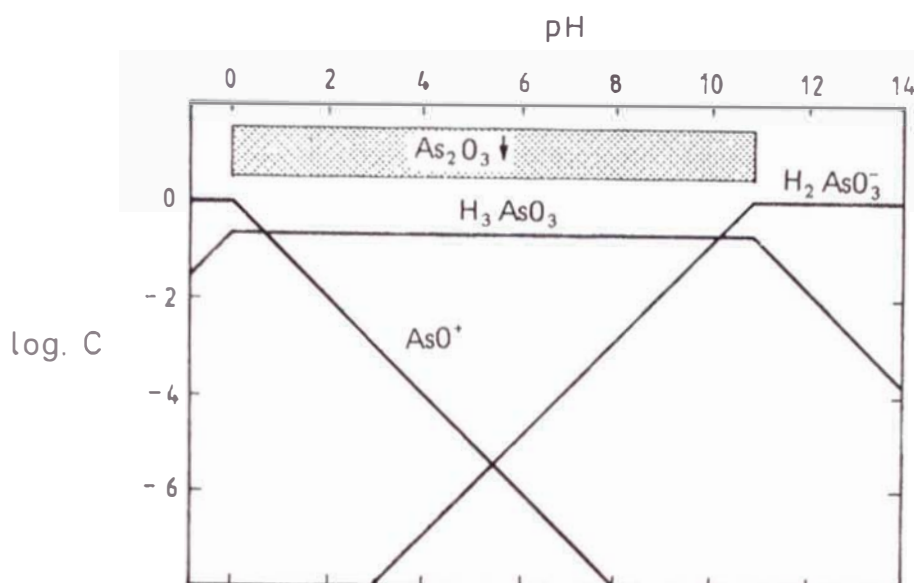
Comportamiento ácido-base.- En medio ácido los compuestos solubles de As(III), originan el catión AsO^+ (**Diagrama N°4**). Es dudosa la existencia del catión As^{3+} , aún en medios muy ácidos, ya que el alto valor de la relación carga/radio le hace muy inestable en medio acuoso.

Al disminuir la acidez, el AsO^+ se transforma en el ácido ortoarsenioso H_3AsO_3 muy débil ($\text{pK}_{\text{A}1} \approx 10$), que coexiste, en concentraciones elevadas de As(III), con el precipitado vítreo As_2O_3 .



Dada la alta solubilidad de este precipitado ($S=0,20\text{M}$), el diagrama logC-pH se ha realizado, en este caso, para una concentración total de As(III) de 0,1 M, a fin de que se observe la zona de formación del óxido, que en estas condiciones predomina entre pH 0 y 11. A valores de pH más elevados se forma, preferentemente, el ión arsenito diácido H_2AsO_3^- , que coexiste con pequeñas cantidades de HAsO_3^{2-} y AsO_3^{3-} , no representados en el diagrama. No está comprobada la existencia del metaarsenito AsO_2^- .

Diagrama N°4. Log C – pH para As (III) 1,0 M



Fuente: F. Burriel Martí y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992

Compuestos.- El trióxido de arsénico, As_2O_3 , que se origina quemando arsénico en el aire, es quizás el compuesto más importante del arsénico. En el lenguaje vulgar, se le denomina "arsénico" y los antiguos le conocían como "arsénico blanco". Es muy tóxico; dosis superiores a 0,005g, ingeridas por vía oral, pueden ser mortales.

Existen varias modificaciones del As_2O_3 ; dos cristalinas (regular y rómbica) y otra amorfa (vítrea). La cristalina se disuelve mal en agua, mientras que la amorfa lo hace bastante mejor.

Los arsenitos son generalmente blancos, solubles en agua o en ácidos diluidos, dando disoluciones incoloras.

El As(III) tiene una especial tendencia a formar compuestos con ciertos radicales orgánicos. (6)

3.3.5 As(V)

En este grado de oxidación, la relación carga/radio del probable catión As^{5+} sería tan elevada que no es posible su existencia en medio acuoso. Se han descrito los cationes menos ácidos AsO^{3+} y AsO^{2+} , que solo existen en débil concentración. Así pues, la química de As(V) en medio acuoso es más bien la del anión arseniato, más o menos protonado.

Comportamiento ácido-base.- En medio ácido existe el ácido ortoarsénico, H_3AsO_4 , soluble y poco disociado. Al disminuir la acidez van apareciendo, sucesivamente, los distintos aniones del ácido, H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} , todos ellos incoloros. El H_3AsO_4 es un poco menos fuerte que el H_3PO_4 . El AsO_4^{3-} es una base relativamente fuerte (**Diagrama N°5**).

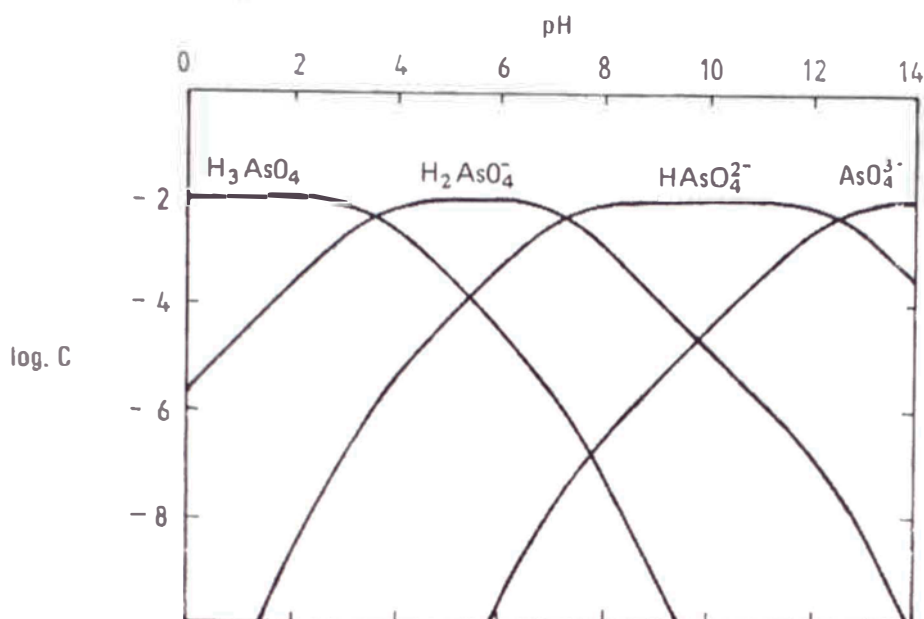
Compuestos.- El pentóxido de arsénico, As_2O_5 , obtenido por deshidratación del ácido ortoarsénico, es un sólido blanco, amorfo, giroscópico y soluble fácilmente en el agua (diferencia del As_2O_3).



Aunque menos tóxico que el trióxido, su manejo es peligroso, como ocurre con la mayoría de los compuestos de arsénico.

El ácido ortoarsénico, $\text{H}_3\text{AsO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ se obtiene al estado sólido (diferencia del ácido arsenioso) en forma de polvo cristalino soluble en agua. La mayoría de los compuestos de arsénico (V) son blancos. (6)

Diagrama N°5. Log C – pH para As (V) 10^{-2} M



Fuente: F. Burriel Martí y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992

3.4 CONCENTRACIÓN DE LAS MENAS CON ARSÉNICO

El estudio de las sustancias puras es un aspecto importante de la ciencia y muchas técnicas nuevas se han desarrollado para obtener sustancias de pureza alta. El aislamiento de un compuesto puro a partir de una mena natural es un proceso largo y en ocasiones tedioso, tal como se describe más adelante. Los métodos generales que se utilizan para este fin pueden dividirse en:

- 1) métodos químicos, siempre que el elemento o compuesto puro se obtenga a partir de otro compuesto (que generalmente existe en la naturaleza como tal) mediante una reacción química o electroquímica.
- 2) métodos físicos, como la cristalización, la destilación fraccionada, la precipitación fraccionada, el equilibrio de partición, etc.

Un método químico de separación generalmente es seguido por un método físico de purificación. La elección del método depende de las propiedades fisicoquímicas del material inicial como del producto y la pureza que se desea alcanzar.

Los métodos físicos incluyen: i) separación por gravedad ii) procesos de flotación, y iii) separación magnética. Los métodos químicos, generalmente denominados operaciones de hidrometalurgia, son la lixiviación de las menas por las soluciones acuosas o la fusión con compuestos químicos para extraer el elemento requerido en forma de una de sus sales solubles.

En general una proporción alta de la ganga puede eliminarse por métodos físicos. En un método físico, el primer paso es moler la mena en un molino de dados o de rodillos, el molido final se lleva a cabo invariablemente en presencia de agua, con el fin de evitar la oxidación de las partículas en las superficies que se han formado. (7)

3.4.1 Proceso de flotación

La separación de mineral y de las partículas de ganga se basa en el principio de modificar la superficie de las partículas de mineral en tal forma que las partículas del mineral se adhieren a las burbujas de aire y flotan con ella en la superficie en donde pueden ser separadas. Las partículas de ganga se sedimentan en el fondo del tanque que se utiliza para la separación.

En el *proceso de flotación de espumas*, se utilizan cuatro tipos de agentes químicos:

- 1) **Espumantes.**- Ayudan a la formación de una espuma estable de aire, en general reduciendo la tensión superficial del agua. Casi siempre son moléculas con una parte terminal hidrofílica y una cadena hidrofóbica, como el aceite de pino, el aceite de eucalipto (que tienen, respectivamente, terpenol y cineol), los cresoles de alquitrán de hulla o los jabones.
- 2) **Colectores o acondicionantes.**- Confieren propiedades hidrofóbicas a las partículas de mineral al unirse a la superficie de los minerales a través de sus partes terminales polares. La partícula recubierta se une a una burbuja de aire que esté en contacto con ella y se desplaza a la superficie. Los espumantes y los colectores poseen las mismas características químicas, pero sus papeles no son intercambiables. La concentración a la cual una sustancia actúa como un espumante es totalmente diferente de la concentración a la cual actúa como un colector. Además, un colector eficaz tiene que ser selectivo en encontrar las partículas para coleccionar, si es que el mineral tiene un gran número de componentes que pueden coleccionarse.

Los colectores generalmente son fenoles, alcoholes superiores (amílico o hexílico), jabones, sulfatos alquílicos de sodio, bases, sales cuaternarias de amonio, ditiofosfatos, xantatos, etc. Los últimos son los que más se utilizan, puesto que son fáciles de preparar y son baratos.

- 3) **Activadores.**- En general son iones inorgánicos, los cuales facilitan la unión de la partícula de colector al mineral. En esta forma, las menas oxidadas son activadas por sulfuro de sodio y la esfalerita es activada por pequeñas cantidades de iones Cu^{2+} .
- 4) **Depresores.**- Impiden la recolección de ciertas partículas por la combinación con las partículas del mineral, alterando sus características superficiales. Si las partículas de la ganga son las únicas afectadas, un depresor que puede alterar permanentemente la superficie del mineral también pueden utilizarse, pero este no es el caso cuando el mineral contiene dos componentes útiles. Así, si una mezcla de esfalerita y galena es separada por el proceso de flotación de espuma, utilizando xantato como colector y cianuro de sodio como depresor, el cual afecta la superficie del sulfuro de zinc, sólo se colecta la galena. (7)

3.4.2 Hidrometalurgia

Se utiliza generalmente para menas de concentración baja. Los aspectos cinéticos de los procesos de la hidrometalurgia son la desventaja principal; sin embargo, se han superado en cierta medida mediante el desarrollo de técnicas rápidas y versátiles de intercambio iónico y de cromatografía que incluyen extracción con disolventes de los complejos metálicos a partir de sus soluciones acuosas. (7)

Ejemplos de operaciones de hidrometalurgia son:

El tratamiento de piritas con ácido sulfúrico en presencia de oxígeno atmosférico,



cuya cristalización produce el sulfato de cobre pentahidratado, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

La lixiviación de la argentita Ag_2S o de la plata córnea con una solución alcalina de NaCN al 1% para obtener una solución de cianoargentato (I). Luego se burbujea aire caliente a la solución para oxidar al Na_2S que se produce en la reacción con la argentita.



3.4.3 Fusión alcalina y otras

Las operaciones de hidrometalurgia se relacionan con el empleo de soluciones acuosas, la temperatura de las cuales no puede elevarse mucho. Sin embargo, con soluciones fundidas, puede obtenerse una temperatura de digestión más alta, de tal forma que hasta las menas más resistentes pueden romperse para formar compuestos solubles.

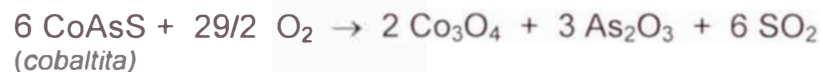
Dichas operaciones requieren la fusión de la mena con carbonatos, sulfatos o hidróxidos de los metales alcalinos, con o sin el coque, en presencia o en ausencia de aire o de agentes oxidantes.

Antes que la mena sea sujeta a la reducción, se le puede purificar mediante calentamiento en presencia o en ausencia de aire y con

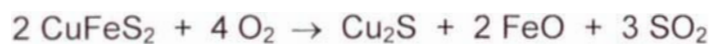
otros ingredientes como silica, coque o cal viva. El proceso se denomina calcinación, tostado o fusión, según el procedimiento que se adopta y la reacción que se lleva a cabo.

Tostación.- Es el calentamiento de la mena en presencia de un suministro de aire. Este proceso elimina las impurezas volátiles fácilmente oxidables, como el arsénico (en forma de As_2O_3), el antimonio (como Sb_2O_3) y el azufre (como SO_2) y, al mismo tiempo, invariablemente oxida la mena al óxido.

Ejemplos de las reacciones que pueden producirse:

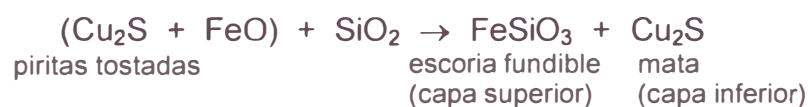


El proceso de tostación puede no producir la oxidación completa de la mena, como sucede en el tostado de las piritas:



Fusión.- Cuando la mena tostada es calentada con un fundente (cal viva, piedra caliza o silica) que puede combinarse con la ganga para formar una escoria fundible y así pueda separarse con facilidad del resto de la mena, el proceso se denomina fusión.

En el caso de impurezas básicas, como los óxidos metálicos el fundente usado es arena (SiO_2),



En el caso de impurezas ácidas, como la arena (SiO_2), la fusión se lleva a cabo en presencia de piedra caliza (CaCO_3),



(se utiliza en el caso de la extracción del hierro)

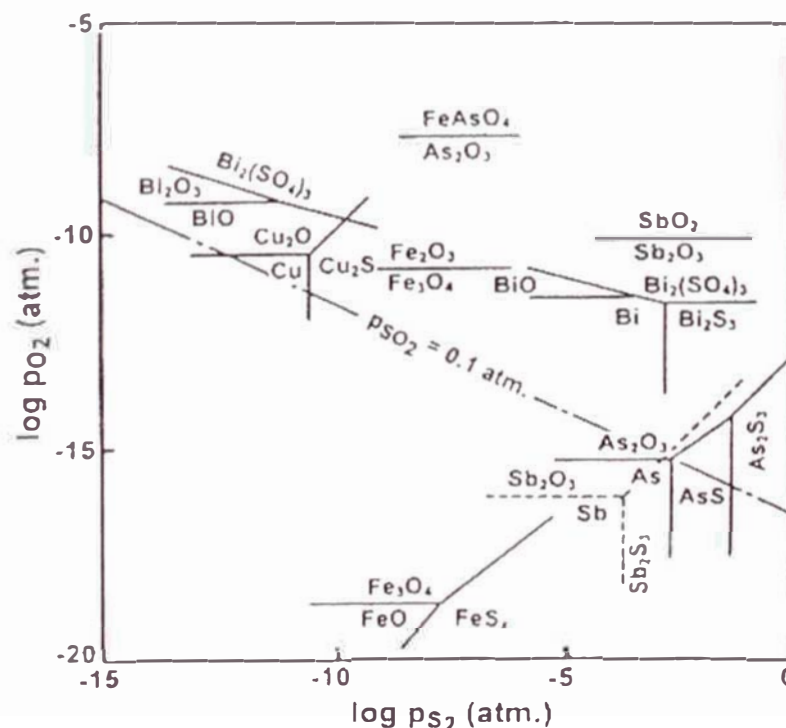
La mayor parte del arsénico que se produce es recuperado en forma de óxido como subproducto de la fusión de menas arsenicales de cobre, oro, plomo y plata.

El arsénico y sus compuestos son muy bien conocidos como sustancias tóxicas cuya liberación hacia el ambiente está estrictamente regulada. Este elemento se encuentra asociado con la mayoría de sulfuros concentrados, que son usualmente primero tratados por tostación o sinterización como paso previo a la fundición o más allá al proceso hidrometalúrgico; sin embargo, el comportamiento del arsénico, a altas temperaturas, es tan complejo que las condiciones de procesamiento óptimo para el control del arsénico, para estos procedimientos metalúrgicos, tienen todavía que ser esclarecidos. El arsénico causa significativos problemas con respecto a la calidad del producto metálico, así como también contribuye a preocupaciones ambientales durante el proceso metalúrgico y en la disposición de residuos. (7)

3.4.4 Propiedades termodinámicas del arsénico

Afinidad por azufre y oxígeno.- El conocimiento de la afinidad del arsénico por el azufre y el oxígeno es de primordial importancia en el análisis termodinámico porque siempre son observados cambios fisicoquímicos de las especies presentes del arsénico durante el procesamiento de minerales sulfurados. El **Diagrama N°6** muestra el comportamiento del potencial químico oxígeno-azufre a 700 °C para varios sistemas ternarios M-S-O, incluyendo el del As-S-O. Este tipo de diagrama de potencial es útil para ilustrar las estabildades de metal, óxidos o sulfuros y la secuencia de oxidación de sulfuros mezclados.

Diagrama N°6. Potencial químico oxígeno/azufre para sistemas ternarios M-S-O a 700 °C



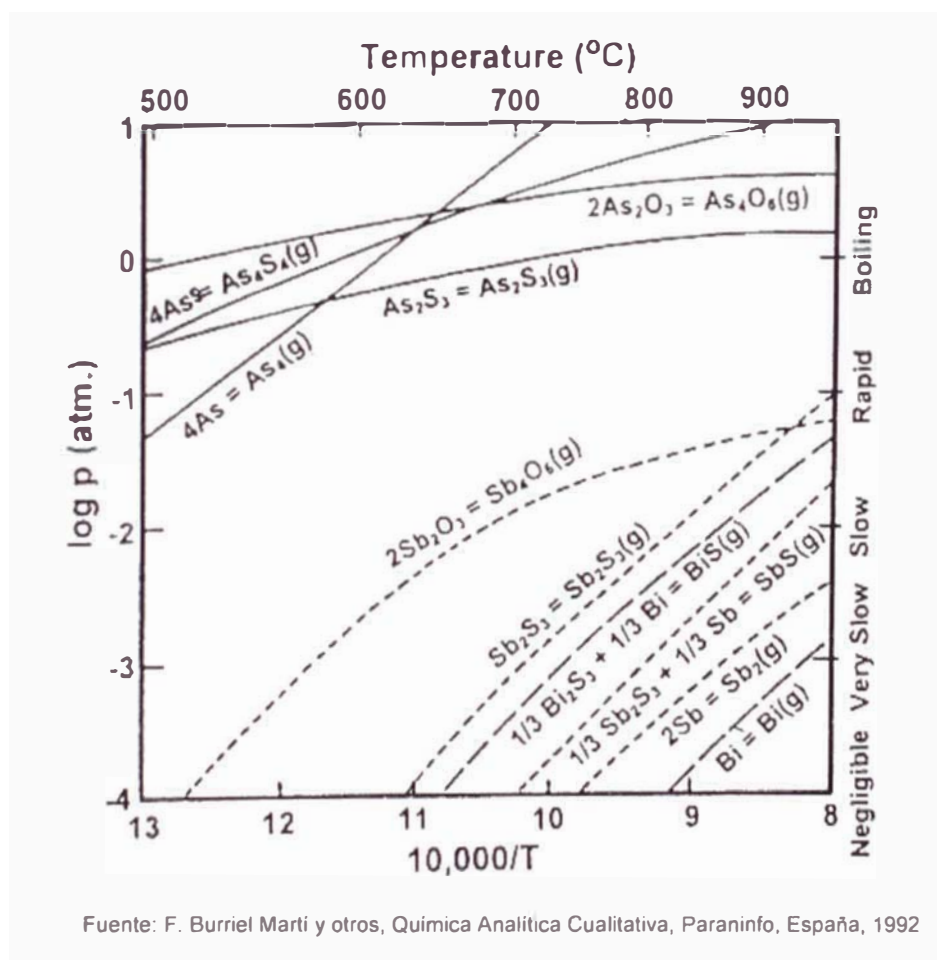
Fuente: F. Burriel Marti y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992

Está claro, a partir de los valores de $\log p_{S_2}$ para los pares metal/sulfuro, que el arsénico tiene una débil afinidad por el sulfuro (alto valor de $\log p_{S_2}$), así como el antimonio y el bismuto, mientras que el cobre tiene una fuerte afinidad por el azufre. El proceso de oxidación del tostado en aire se aproxima bien a lo largo de una línea de presión parcial de dióxido de azufre, donde $p_{SO_2}=0,1$, y es aparente que las especies AsS será oxidada a As o As_2O_3 antes que la oxidación de FeS a Fe_2O_3 comience. Los valores de $\log p_{O_2}$ para los pares metal /óxido muestran que el arsénico se encuentra entre el antimonio y el bismuto en su afinidad por oxígeno. A altas temperaturas se incrementa la estabilidad del arsénico metálico, mientras que el óxido As_2O_3 es más estable a bajas temperaturas. La mayoría de la especies de arsénico son volátiles, pero en la presencia de Fe_2O_3 cualquier arsénico oxidado a As_2O_3 tiende a formar arsenato de hierro (III) no volátil, $FeAsO_4$, bajo presiones parciales de oxígeno mayores que $10^{-7,78}$ atm a $700\text{ }^\circ\text{C}$.

Presión de vapor de especies de arsénico.- La mayoría de especies de arsénico tienen presiones de vapor como se muestra en el **Diagrama N°7**, aunque hay excepciones, por ejemplo $FeAsO_4$, As_2O_4 y As_2O_5 no son volátiles. A bajas temperaturas el óxido polimerizado gaseoso $As_4O_6(g)$ tiene la mayor presión de vapor, pero por encima de los $700\text{ }^\circ\text{C}$ predominan gases elementales polimerizados o sulfuros como $As_4(g)$ o $As_4S_4(g)$, teniendo el $As_4(g)$ la más elevada presión de vapor. Sin embargo,

en general, las especies gaseosas polimerizadas incrementan su disociación con el incremento de temperatura y decrecimiento de la concentración de arsénico. Así, $\text{As}_2(\text{g})$, $\text{AsO}(\text{g})$ y $\text{AsS}(\text{g})$ predominan como especies volátiles de arsénico a temperaturas de fusión. (8)

Diagrama N°7. Presiones de vapor de especies volátiles de arsénico, antimonio y bismuto. La ordenada derecha indica la velocidad de vaporización relativa en el flujo de gas forzado.



3.4.5 Condensación de arsénico a partir de gases residuales

El comportamiento del arsénico durante el enfriamiento de gases residuales es también de gran preocupación para los metalurgistas, y percepciones útiles pueden ser obtenidas mediante la simulación

termodinámica. Cuando el concentrado de la **Tabla N°20** es oxidado con aire conteniendo 2 000 moles de O_2 y 7 660 moles de N_2 , 65% de mata de cobre y escoria se producirán junto con el gas cuya composición se muestra en la **Tabla N°21**.

Tabla N°20. Composición de concentrado de cobre (1 000 mol de concentrado de Cu pesan 205,8 kg)

Composición en moles de especies presentes					
CuFeS ₂	FeS ₂	ZnS	PbS	AsS _{1,5}	
1 000 mol	100 mol	50 mol	20 mol	5 mol	
Composición en porcentaje en peso de los elementos					
Cu	Fe	S	Zn	Pb	As
30,88	29,85	35,48	1,59	2,01	0,18

Fuente: Akira Yazawa, Behavior of Nasty Species in Waste Gas Treatment, Japón, 2000.

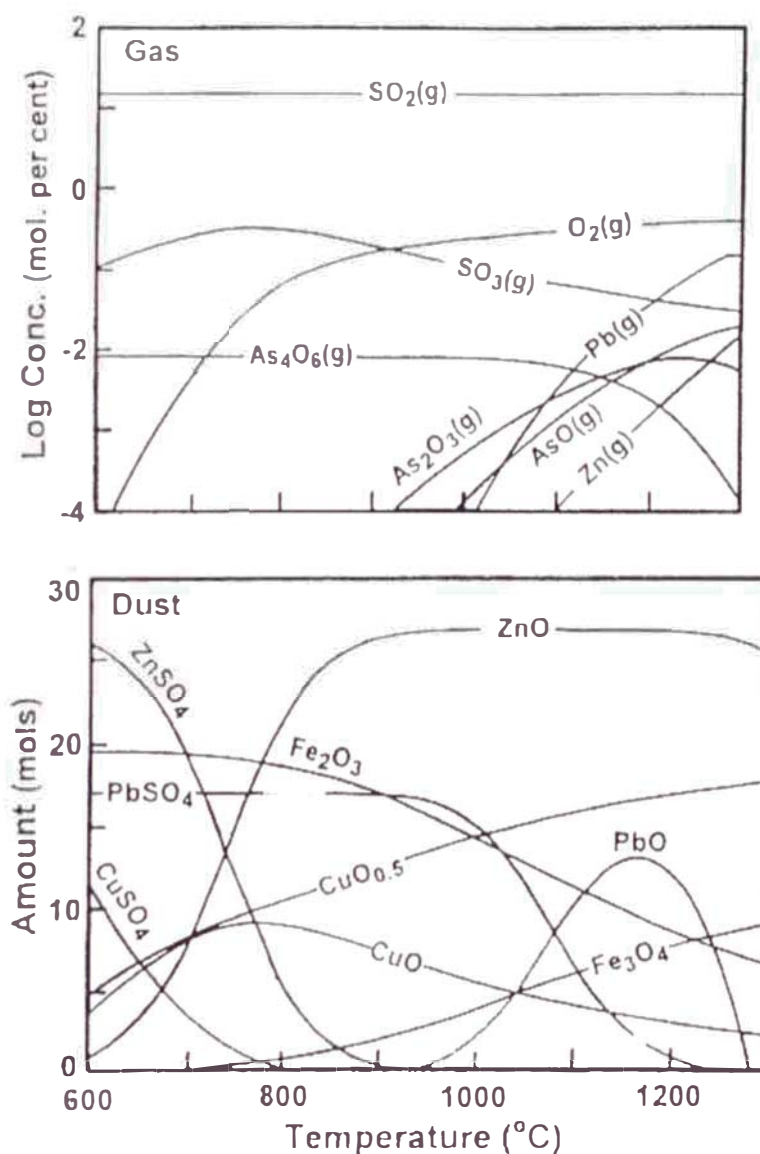
Tabla N°21. Cantidades de cada gas (en moles) que se equilibran con mata de cobre al 65% y escoria

N_2	SO_2	S_2	Zn	Pb	PbS	As_2	AsO	AsS
7 660	1 500	43,6	27,0	1,49	15,6	0,535	0,527	1,73

Fuente: Akira Yazawa, Behavior of Nasty Species in Waste Gas Treatment, Japón, 2000.

Este gas se asume que deja el reactor de fundición junto con algo de polvo removido, cuya composición es 10 mol de Fe_3O_4 , 10 mol de FeS y 20 mol de $CuS_{0,5}$ y también con algo de aire del acceso, constituido por 200 moles de O_2 y 766 moles de N_2 . La extensión de la condensación de especies desde el gas y las variaciones en las composiciones del gas pueden ser termodinámicamente predecidas como se muestra en el **Diagrama N°8**.

Diagrama N°8. Composición esperada del gas (figura de arriba) y constitución del polvo (figura de abajo) durante el enfriamiento del gas junto al aire de ingreso (conteniendo 200 moles de O₂) y polvo ingresado.



Fuente: F. Burriel Martí y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992

Tabla N°22. Presión de vapor de As₂O₃ (atm) de acuerdo a la reacción $2\text{As}_2\text{O}_3 = \text{As}_4\text{O}_6(\text{g})$

120 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	220 °C
$1,15 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-6}$	$2,64 \times 10^{-5}$	$1,02 \times 10^{-4}$	$3,46 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-3}$

Fuente: Akira Yazawa, Behavior of Nasty Species in Waste Gas Treatment, Japón, 2000.

Debido a la alta velocidad del gas residual durante el enfriamiento, las reacciones sólido-sólido muy lentas tales como la formación de ferrita y la formación a baja temperatura de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ son despreciables. La tendencia general muestra, para ambas fases gas y sólido, que se compara muy bien con lo que es observado en la práctica. Cuando la cantidad de aire en el acceso decrece, las cantidades de tales especies como PbO , PbS , $\text{CuS}_{0,5}$, etc., que son causas primarias de acrecentamiento de crisol, tienden a incrementarse a temperaturas más bajas. Así, la óptima regulación del ingreso de aire es importante, si problemas de crisol tienen que ser evitados y se tiene que obtener polvo de buena calidad adecuado para su colección y posterior tratamiento.

En la presencia de Fe_2O_3 , la especie estable de arsénico es el arsenato de hierro (III) no volátil, FeAsO_4 , y es sugerido el uso de un reactor de lecho fluido como un método de limpieza de gas seco para remover el arsénico del gas en forma FeAsO_4 . Sin embargo, en sistemas de tratamiento de gas típicos, la velocidad es muy alta que no permite el tiempo necesario para la formación del FeAsO_4 y la mayor parte del arsénico se mantiene en forma de $\text{As}_4\text{O}_{6(g)}$. Como es sugerido en el **Diagrama N°7** y en la **Tabla N°22**, la presión de vapor del As_2O_3 es tan alta que el $\text{As}_4\text{O}_{6(g)}$ mostrado en el **Diagrama N°8**, la cual tiene una presión parcial de 10^{-4} (0,01 mol por ciento) atm, nunca condensará a temperaturas por encima de 180 °C. Temperaturas menores a 120 °C son necesarias para una

completa condensación del arsénico. Por consiguiente, el gas residual que pasa a través de un precipitador electrostático caliente no puede ser enviado directamente a la chimenea sino que debe ser enfriado por varios métodos hasta menos de 120 °C para precipitación satisfactoria del arsénico. (8)

3.5 TOXICIDAD DEL ARSÉNICO

3.5.1 Mecanismo de acción

El estudio del mecanismo por el cual un agente químico produce un efecto tóxico permite prevenir estos, estudiar el uso de un antídoto, aplicar pruebas para la evaluación de la exposición, establecer límites permisibles de exposición y entender las alteraciones producidas a nivel bioquímico.

Inhibición de un activador o cofactor de enzimas.- El arsénico trivalente, As(III), se une a los grupos –SH para formar un complejo tioarsenioso, así, las enzimas cofactores que poseen grupos tioles serán inhibidos por el arsénico. Entre las diversas reacciones inhibidas, la más sensible es la descarboxilación oxidativa de los ácidos cetónicos, principalmente del ácido pirúvico, el cual participa en una etapa esencial del metabolismo oxidativo. Algunos de los efectos tóxicos del arsénico se atribuyen a esta inhibición.

El As(III) bloquea la oxidación del ácido pirúvico debido a que se combina con los grupos tioles del ácido lipoico (ácido 6,8-ditiooctanoico), cuya fórmula química es:

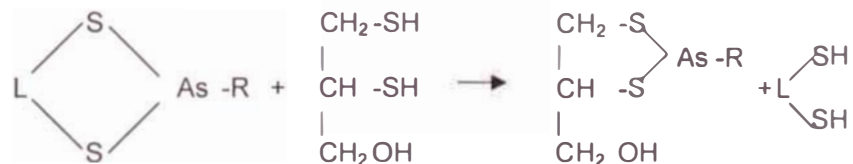


SH

y a la cual denominaremos HS-L-SH; acumulándose el ácido pirúvico.



El antídoto recomendado es el 2,3-dimercapto propanol, denominado BAL (British Antilewisita), debido a que este compuesto posee dos grupos -SH capaces de reaccionar con el arsénico trivalente, liberando el ácido lipoico de acuerdo a la siguiente reacción:



El complejo BAL-As es eliminado en orina. También el ácido 2,3-dimercaptosuccínico presenta características útiles para ser empleado como antídoto para intoxicaciones con arsénico. (9)

3.5.2 Medidas de salud y seguridad

El tipo más común de exposición profesional al arsénico es a los compuestos de arsénico inorgánico. Cuando exista riesgo de exposición a gas arsina, debe tenerse especial precaución de evitar fugas accidentales, ya que las exposiciones a concentraciones

elevadas durante intervalos cortos pueden ser especialmente graves.

El mejor método de prevención consiste en mantener la exposición en niveles muy inferiores a los límites de exposición aceptables. Por lo tanto, es importante contar con un programa de determinación de las concentraciones ambientales de arsénico.

Además de la exposición por inhalación, debe controlarse la exposición por vía oral a través de la ropa, manos, tabaco, etc. contaminado. Se debe proporcionar a los trabajadores ropa de protección adecuada, botas protectoras y, cuando exista riesgo de que se sobrepase la exposición límite al arsénico en suspensión aérea, equipo de protección respiratoria. Los casilleros deberán constar de compartimentos separados para la ropa personal y la de trabajo y los trabajadores deberán disponer de instalaciones sanitarias adyacentes de buena calidad. Debe estar prohibido fumar, comer y beber en el lugar de trabajo. Deben realizarse reconocimientos médicos previos al ingreso.

En los trabajos con arsénico, no se recomienda emplear a personas con antecedentes de diabetes, enfermedades cardiovasculares, anemia, trastornos alérgicos o cutáneos de otro tipo y lesiones neurológicas hepáticas o renales. Se deben realizar reconocimientos médicos periódicos de todos los empleados

expuestos al arsénico, prestando especial atención a los síntomas posiblemente relacionados con el arsénico.

La determinación del nivel de arsénico inorgánico y sus metabolitos en la orina permite calcular la dosis total de arsénico inorgánico captado por las distintas vías de exposición. Este método sólo es útil cuando se pueden determinar específicamente el arsénico inorgánico y sus metabolitos. Los valores de arsénico total en la orina proporcionan a menudo una información errónea sobre la exposición industrial, pues una sola comida a base de pescado u otros organismos marinos, que contienen cantidades considerables de compuestos arsenicales no tóxicos, puede producir concentraciones muy elevadas de arsénico en la orina durante varios días. (10)

CAPÍTULO IV METODOLOGÍAS APLICADAS

4.1 METEOROLOGÍA DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

4.1.1 La atmósfera

La atmósfera global está constituida aproximadamente por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón, así como por rastros de otros gases. Estas relaciones cambian muy poco con el lugar o el tiempo en la mayor parte de la atmósfera. El contenido de humedad de la atmósfera, como vapor de agua y gotas de líquido o cristales de hielo, cambia de manera significativa con el lugar y el tiempo. La humedad relativa (HR) es la relación del contenido de agua del aire al contenido de agua de saturación. El contenido de agua de la atmósfera, en la saturación, aumenta con rapidez al aumentar la temperatura. A cualquier temperatura, la cantidad absoluta de agua en el aire, expresada como porcentaje molar, aumenta al aumentar la HR.

La atmósfera tiene una frontera inferior perfectamente bien definida -pero bastante desigual-, la superficie de la tierra y los océanos. Su frontera superior no está tan bien definida; la atmósfera sencillamente se enrarece cada vez más al aumentar la altura, hasta llegar al enrarecimiento del espacio exterior. La atmósfera

posee gran ancho y poca profundidad, lo que significa que la mayor parte de los movimientos de la atmósfera deben ser horizontales. Excepto por las tormentas muy intensas, los movimientos verticales de la atmósfera son menores en uno o dos ordenes de magnitud menor que los horizontales. (11)

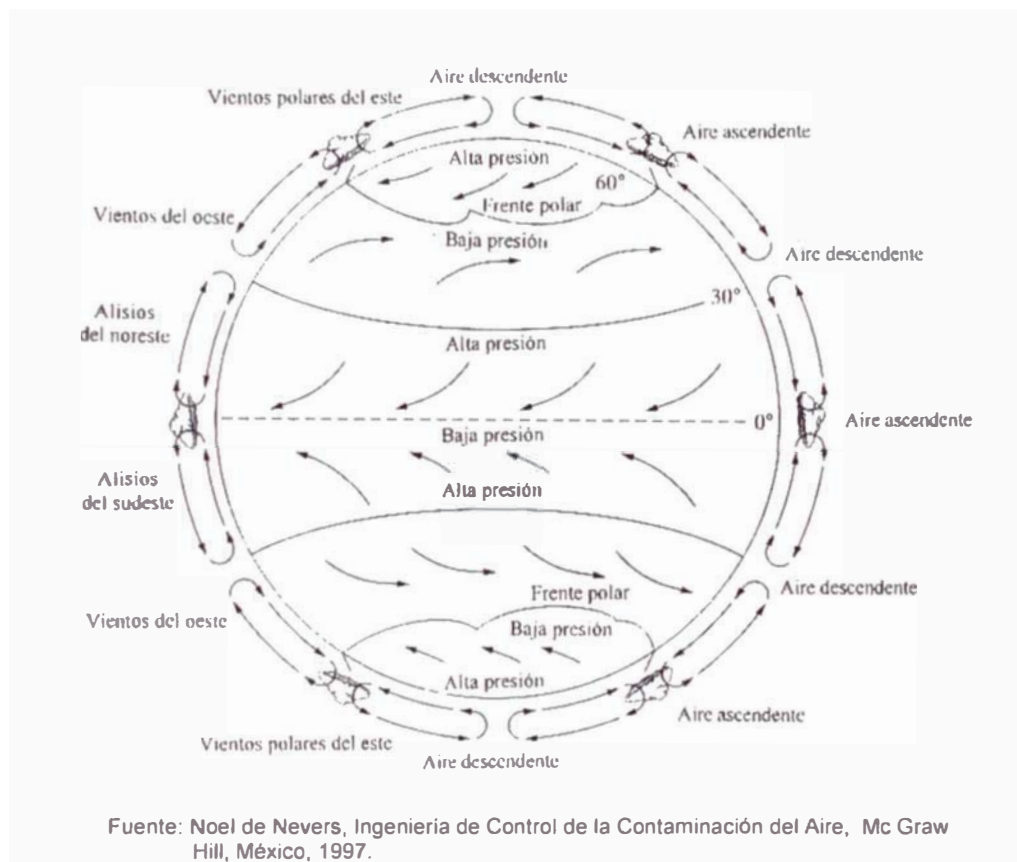
4.1.2 Movimiento atmosférico horizontal

El movimiento horizontal de la atmósfera es provocado en su mayor parte por un calentamiento desigual de la superficie de la tierra y es modificado por el efecto de rotación de esta última (fuerza de Coriolis) y por la influencia del terreno y el mar.

Calentamiento ecuatorial, enfriamiento polar.- Promediado, durante un año, el flujo de calor solar a la superficie de la Tierra en el ecuador es 2,4 veces el que se tiene en los polos. Como respuesta a esta diferencia en el calentamiento. La atmósfera se mueve y, al hacerlo, lleva calor de los trópicos hacia los polos, la distribución del calor es el resultado del aire caliente que sube en la fuente de calor y del aire frío que se hunde en donde los alrededores están más fríos. Con el aire subiendo en el ecuador y hundiéndose en los polos se tendría un flujo del ecuador hacia los polos, a grandes altitudes, y de los polos hacia el ecuador, en la superficie, como se muestra en la **Figura N°1**. Sin embargo, debido a que la atmósfera es bastante delgada en relación con su ancho, ese flujo es mecánicamente inestable y se rompe en subceldas.

Podría existir cualquier número impar de esas celdas en cada hemisferio; normalmente, sobre la Tierra existen tres celdas en cada uno.

Figura N°1. Representación esquemática de la circulación general de la atmósfera



Efecto de la rotación de la Tierra.- La manera más común de hacer la corrección por la curvatura observada en el recorrido en línea recta de una partícula en el aire, es introducir un ajuste por el giro de los marcos de referencia, llamado fuerza de Coriolis, la cual, cuando se añade a las otras fuerzas de la Ley de Newton del movimiento, predice con corrección el comportamiento observado.

Influencia de la Tierra y el mar.- Las cadenas montañosas principales, son importantes barreras para los vientos horizontales y, de manera regular, tienen climas muy diferentes en uno de sus lados que en el otro. Incluso las montañas más pequeñas y los valles pueden influir intensamente sobre la dirección del viento, aunque a una escala más pequeña.

La superficie de la tierra se calienta y se enfría con rapidez del día a la noche y del verano al invierno, debido a que la tierra sólida es mala conductora del calor. La superficie de los océanos y lagos se calienta y enfría con lentitud, en su mayor parte porque sus capas superficiales son agitadas por los vientos y por corrientes naturales de convección, mezclando de este modo el calor hacia arriba y hacia abajo. La tierra sólida no es agitada por el viento o por corrientes de convección, de modo que el calor no se puede mezclar hacia arriba y hacia abajo; su temperatura superficial cambia con mayor rapidez que, como sucede, en las masas de agua. Por tanto, **el calentamiento o enfriamiento de la capa de aire adyacente al piso sólido es mucho más rápido en comparación con el aire que está sobre las masas de agua.**

(11)

4.1.3 Movimiento vertical en la atmósfera

Los movimientos verticales y horizontales de la atmósfera interactúan entre sí; los flujos horizontales son provocados al

elevarse el aire en el ecuador y hundirse en los polos. En la atmósfera, cualquier porción de aire que sea menos densa que el aire que la rodea se elevará por la acción de un empuje vertical, y cualquier porción que sea más densa que el aire que la rodea se hundirá por la acción de un empuje vertical negativo. La mayor parte de los movimientos en la atmósfera son causados por cambios en la densidad del aire. (11)

4.1.4 Vientos

En la **Figura N°1** se muestra el patrón general de circulación de los vientos en el mundo. Existen numerosas variaciones locales, tanto en el espacio como en el tiempo.

Velocidades.- Las velocidades más altas del viento al nivel del suelo son las de los tornados, hasta de 300 km/h. La velocidad promedio del viento al nivel del suelo en la mayor parte de América del Norte (de día y de noche, en verano e invierno) es alrededor de 16 km/h, rara vez sopla el viento a menos de alrededor 3,6 km/h. La mayor parte de los servicios meteorológicos informan de cualquier viento de menos de aproximadamente 3,6 km/h como "calma", porque sus instrumentos de medición del viento, llamados anemómetros, se vuelven no confiables para velocidades tan bajas. La velocidad del viento aumenta con la elevación, la mayor parte del tiempo, en la mayor parte de la troposfera. La razón es que la fricción con la tierra desacelera el viento. Típicamente, el viento alcanzará su velocidad sin fricción (llamada velocidad geostrófica o

de gradiente) a más o menos 500 m por encima del suelo. La región por debajo de esta elevación, en donde la fricción de la tierra desempeña un papel significativo, es la **capa frontera planetaria**. La velocidad del viento al nivel del suelo queda determinada en gran parte, según qué tan bien está acoplada esta capa con la capa geostrófica en movimiento rápido que está arriba de ella. Cuando la atmósfera es estable o tiene una inversión, existe poco movimiento vertical, y el acoplamiento entre la capa frontera planetaria y la geostrófica es débil. De este modo, las inversiones y las atmósferas estables normalmente se encuentran asociadas con velocidades bajas del viento al nivel del suelo.

Cuando la capa frontera planetaria es inestable, hay bastante movimiento vertical en la atmósfera inferior y, por tanto, bastante transferencia de cantidad de movimiento vertical entre esa capa frontera planetaria y el viento geostrófico. Por consiguiente, las atmósferas inestables tienen velocidades más altas del viento al nivel del suelo que las estables. Es de esperar vientos más fuertes al nivel del suelo a principios de la tarde que en la mañana o a finales de la tarde o noche. Las carreras de veleros siempre se programan para principios de la tarde.

El aumento del viento a nivel del suelo, causado por la inestabilidad, es autolimitativo; estos vientos tienden a destruir la inestabilidad atmosférica que los causaron.

Dirección del viento.- Tanto las montañas, como los valles y las líneas costeras influyen sobre la dirección y magnitud del viento, así como sobre otros parámetros meteorológicos. En una noche clara, el suelo se enfría por la radiación hacia el espacio exterior y, adyacente a él, se forma una capa de aire que está más fría y, por consiguiente, más densa que el aire que se encuentra arriba de ella. Si el suelo fuera perfectamente plano, esta capa sería perfectamente plana y la gravedad no tendería a moverla. Pero la tierra no es plana, entonces esta capa más densa tenderá a fluir cuesta abajo. Entre más pronunciada sea la cuesta, el aire fluye más rápido. En cualquier valle, el aire frío fluye hacia abajo hasta el fondo y, enseguida, el aire frío recogido fluye hacia debajo de ese valle en la misma dirección que corre el arroyo o río en el mismo.

Durante el día ocurre lo opuesto. La Tierra calentada por el Sol calienta a su vez el aire adyacente a ella, el cual entonces fluye hacia arriba por la fuerza de empuje. Lo normal es que uno de los lados del valle sea calentado con mayor intensidad por el Sol que el otro, de modo que el aire empezará a elevarse en ese lado, con lo que se causa un flujo giratorio con su eje a lo largo del eje del valle. Esto se sobrepone a un movimiento neto hacia arriba del aire calentado, lo que provoca un flujo hacia arriba de la pendiente y hacia arriba del valle durante el día que, en general, no es tan fuerte como el flujo nocturno.

Las montañas pueden actuar como barreras para los vientos a nivel bajo. Estas estorban el viento, también atrapan masas de aire en la cuenca, lo que evita la dilución de las emisiones.

Al estimar la dirección del viento en cualquier momento y en cualquier lugar, se pueden aplicar las reglas empíricas siguientes:

- 1) Las tormentas y los frentes importantes, que se mueven con rapidez, dominan las influencias locales; los vientos locales al nivel del suelo soplan de la manera que les imponen las tormentas más grandes en importancia.
- 2) En los valles profundos, la alternación diaria –viento hacia arriba del valle en el día y hacia abajo en la noche- vence la mayor parte de las demás influencias y determina la mayor parte del flujo local, cuando no dominan una tormenta o paso frontal importantes. El efecto de valle es mayor en los valles profundos que en los de poca profundidad, en los valles empinados que en los suaves, en la noche que en el día, y en condiciones de invierno ligero y cielo claro que con viento fuerte o nubosidad.
- 3) Las brisas hacia la costa y hacia fuera de esta dominan cuando no se tiene una tormenta importante. Es más probable que controlen la dirección del viento en condiciones de viento ligero y cielo claro que en las condiciones opuestas, y es más probable que lo controlen en el día que en la noche.

- 4) Si ninguno de los efectos antes mencionados, o cualesquiera otros de la topografía local están presentes, es más probable que la dirección del viento sea la que se indica en la **Figura N°1** que cualquiera otra. Los pronósticos de la figura son mejores cerca del ecuador que cerca de los polos.

De manera regular los servicios meteorológicos preparan **rosas de los vientos**. En estas se resumen la frecuencia de los vientos de velocidades y direcciones variables en un lugar. Normalmente se habla de un viento, y se traza la gráfica de él, en términos de la dirección **de la cual viene**. Un viento del oeste sopla de oeste a este.

Inversiones de Temperatura.- Las inversiones de temperatura desempeñan un papel significativo en la meteorología de la contaminación del aire. Dentro de una inversión, el aire es estable contra el movimiento vertical por empuje. Esa estabilidad también disminuye el cambio de energía del viento entre la capa de aire cercana al suelo y los vientos a gran altitud, de modo que se obstaculiza tanto la dispersión horizontal como la vertical de los contaminantes.

Existen cuatro maneras para producir una inversión: enfriar una capa de aire desde abajo, calentar una capa de aire desde arriba, hacer fluir una capa de aire caliente sobre una de aire frío o hacer

fluir una capa de aire frío debajo de una de aire caliente. Todas estas ocurren, la primera es la inversión más común.

Todas las inversiones, al nivel del suelo o a mayores elevaciones, inhiben el mezclado atmosférico y, por ende, conducen a la acumulación de contaminantes. En el verano, con los cielos claros, el calentamiento del suelo por el Sol normalmente eliminará una inversión todos los días. Sin embargo, los efectos locales, como las brisas frías hacia las costas, pueden ser bastante poderosas como para mantener las inversiones. En invierno, a menudo el Sol no es bastante fuerte como para eliminar esas inversiones y estas pueden persistir hasta que una tormenta importante lleve vientos bastante fuertes como para vencer los efectos topográficos locales y barrerlas. Si la inversión es bastante fuerte como para formar niebla en un valle, esta reflejará la luz solar, lo que hace que la inversión persista más tiempo del que duraría sin la niebla. Las inversiones persistentes por drenaje en cuencas cerradas o semicerradas muchas veces conducen a concentraciones máximas de los contaminantes. (11)

4.1.5 Modelos de concentración de contaminantes del aire

Para planear y poner en práctica programas de control de la contaminación del aire diseñados para cumplir con los requisitos expresados en las leyes, se deben predecir las concentraciones en el aire del ambiente, las cuales serán resultado de cualquier conjunto planeado de emisiones. Incluso si no se aplicara este tipo

de legislación sobre la contaminación del aire, es probable que se aplicara alguna otra clase de legislación que hiciera cierto uso de predicciones de las concentraciones de contaminantes en el ambiente. Estas predicciones se hacen por vía de los modelos de concentración de los contaminantes.

Casi todos los modelos son sencillos balances de materiales. Un balance de materiales es una contabilidad en la que se aplica la ecuación general del balance a alguna especie. En nuestro caso, la especie de la que se está dando cuenta es el contaminante del aire en estudio. La ecuación general del balance se aplica a algún conjunto especificado de fronteras y se puede escribir como sigue:

$$\text{Velocidad de acumulación} = \text{Todos los gastos de entrada} - \text{Todos los gastos de salida} + \text{Velocidad de creación} - \text{Velocidad de destrucción} \dots \text{Ec(1)}$$

Modelo de caja fija

Considérese una ciudad rectangular, como se muestra en la **Figura N°2**. Con el fin de calcular la concentración del contaminante del aire, con la aplicación de la Ecuación 1, en esta ciudad, se establecen las importantes hipótesis simplificadoras que se dan a continuación:

- 1) La ciudad es un rectángulo con dimensiones W (ancho) y L (largo), y con uno de sus lados paralelos a la dirección del viento.

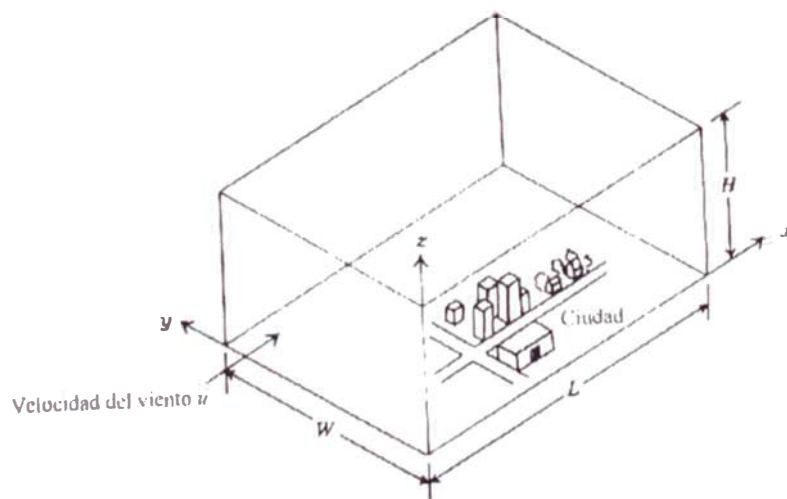
- 2) La turbulencia atmosférica produce el mezclado completo y total de los contaminantes hasta la altura de mezclado H , y no hay mezclado por encima de esta altura.
- 3) Esta turbulencia es bastante fuerte en la dirección contra el viento, de modo que la concentración del contaminante es uniforme en el volumen completo de aire que está sobre la ciudad y no a más altura, en el sentido de la dirección del viento y en el sentido contra el viento. Esta hipótesis es bastante contraria a lo que se observa en la naturaleza, pero permite una gran simplificación del aspecto matemático.
- 4) El viento sopla en la dirección x con velocidad u . Esta velocidad es constante e independiente del tiempo, lugar o elevación por encima del suelo. También esto es contrario a la observación; la velocidad del viento aumenta con la elevación. En lo que sigue se usa la u promedio entre aquella correspondiente al nivel del suelo y la de la altura H .
- 5) La concentración del contaminante en el aire que entra a la ciudad (en $x = 0$) es constante e igual a b (b es concentración "de fondo").
- 6) El índice de emisiones del contaminante del aire de la ciudad es Q (normalmente expresado en g/s). Lo normal es que este se dé como un índice de emisiones por unidad de área, q , en $g/s.m^2$. Se puede convertir, uno en el otro, por medio de:

$$Q=qA \quad \dots \quad Ec(2)$$

en donde A es el área de la ciudad, la cual es igual a W multiplicado por L , en este caso. Este índice de emisiones es constante y no cambia con el tiempo.

- 7) Ningún contaminante sale o entra por la parte superior de la caja, ni por los lados que no sean paralelos a la dirección del viento.
- 8) El contaminante en cuestión tiene una duración suficiente en la atmósfera como para que la velocidad de destrucción de la Ecuación 1 sea cero.

Figura N°2. Ciudad rectangular en la que se indica el significado de los símbolos usados en el modelo de la caja fija.



Fuente: Noel de Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Mc Graw Hill, México, 1997.

Con estas hipótesis, ahora se pueden evaluar todos los términos de la Ecuación 1. Se elige el volumen WLH como el sistema. Debido a que todas las hipótesis indican que los flujos y los índices

de emisiones son independientes del tiempo, se ve que esta es una situación de estado estacionario en la que nada está cambiando con el tiempo. Para cualquier situación de estado estacionario, en cualquier aplicación de la ecuación general del balance (1), la velocidad de acumulación es cero, de modo que el término a la izquierda del signo igual es cero.

Se puede tratar el índice de emisiones Q como un índice de creación o como un flujo hacia el interior de la caja a través de su cara inferior. Cualquiera de las dos concepciones da exactamente el mismo resultado; en la literatura de la contaminación del aire, es más común tratarlo como un flujo a través de la cara inferior, de modo que se fijará la velocidad de creación igual a cero. De este modo, la Ecuación 1 se ha simplificado hasta

$$0 = \text{Todos los gastos de entrada} - \text{Todos los gastos de salida} \dots \text{Ec(3)}$$

Se tienen dos gastos de entrada. El gasto de entrada del contaminante hacia adentro de la cara contra el viento de la ciudad es

$$\text{Gasto de entrada} = uWHb \dots \text{Ec(4)}$$

Los primeros tres símbolos constituyen el volumen de aire que cruza la frontera contra el viento del sistema por unidad de tiempo.

El segundo gasto de entrada es el de contaminante emitido por la ciudad hacia el interior por la frontera, o cara, inferior del sistema,

$$\text{Gasto de entrada} = Q = qWL \dots \text{Ec(5)}$$

Según las hipótesis precedentes, la concentración en la ciudad completa es constante e igual a c . La única manera en la que el contaminante sale del sistema es por el flujo hacia afuera a través de la cara en la dirección del viento. El gasto de salida se expresa por la ecuación

$$\text{Gasto de salida} = uWHc \quad \dots \text{Ec}(6)$$

Si se sustituyen estas expresiones en la Ecuación 1 y se despeja c , se encuentra:

$$c = b + \frac{qL}{uH} \quad \dots \text{Ec}(7)$$

que es el sencillo modelo de caja fija.

Esta ecuación se puede aplicar con sencillez, pero hay que observar que W no entra en el cálculo ni influye en el resultado. Esto es razonable para el modelo elegido; si se duplica el ancho de la ciudad, manteniendo q constante, no cambiaría c .

Resulta claro que la Ecuación 7 es una gran simplificación de lo que en realidad ocurre en la naturaleza. Sin embargo, entran todas las variables importantes, con los signos y potencias correctos. Con esto se indica que la concentración en contra del viento, para un contaminante de larga duración, es aditiva a la concentración producida por la ciudad, y que esta última aumenta al incrementarse q y L y disminuye al aumentar u y H .

El sencillo modelo de caja fija de la Ecuación 7 y sus modificaciones, así como la mayor parte de los otros presentados en el capítulo, predicen concentraciones para sólo una condición

meteorológica específica. Para hallar la concentración promedio anual de algún contaminante, se tendría que usar la distribución de frecuencias de diversos valores de la dirección del viento, u , y de H , calcular la concentración, con base en la ecuación 7, para cada valor y , a continuación, multiplicar por la frecuencia y sumar, con el fin de hallar el promedio anual; es decir, (11)

$$\left[\begin{array}{c} \text{Concentración} \\ \text{promedio} \\ \text{anual} \end{array} \right] = \sum_{\text{sobre todas las} \\ \text{condiciones} \\ \text{meteorológicas}} \left[\begin{array}{c} \text{Concentración} \\ \text{para esa} \\ \text{condición} \\ \text{meteorológica} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{Frecuencia de} \\ \text{ocurrencia de} \\ \text{esa condición} \\ \text{meteorológica} \end{array} \right] \dots \text{Ec}(8)$$

4.2 METODOS DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

4.2.1 Muestreo y análisis de los contaminantes del aire

Se dedica un énfasis especial a los métodos de identificación de macro partículas de polvo ya que estos constituyen la clase mayor y más evidente de los contaminantes del aire.

Se estima que tiene origen natural hasta el 15% del total del polvo sedimentable y quizás llegue al 25% de las micropartículas en suspensión. De modo que la contaminación misma no es contaminación pura. Su composición no está determinada solo por la naturaleza de la industria que la provoca sino también por la naturaleza del terreno sobre el que se asienta.

Para llegar a establecer ciertos criterios sobre la calidad del aire ambiental, se consideran las siguientes propiedades de los contaminantes en macropartículas:

Concentración en el aire

Composición química

Estructura mineralógica

Contaminantes acompañantes

Estado físico del contaminante

Velocidad de transferencia al dominio receptor

La propiedad de mayor interés, entre las que posee el aire, es su capacidad para mantener la vida. Cualquier interferencia en esta función tan extremadamente necesaria, debida a la presencia de gases o macropartículas que resulten ser tóxicos para la vida, es de gran interés para el profesional (químico) interesado en la contaminación del aire.

Después de haber decidido el tiempo, la velocidad y el procedimiento para la toma de muestra es preciso elegir el lugar de toma de muestra. La nariz humana, que constituye el principal canal por el que entran los contaminantes del aire al organismo, suele operar a una distancia entre 1,5 y 1,8 m del suelo. Por eso parece apropiado tomar muestras del aire a una altura comprendida entre esos límites.

Se suelen dividir los contaminantes en macropartículas, entre el polvo que sedimenta el aire y el polvo que se mantiene suspendido en aerosol. El factor físico que determina la clase a que pertenece es el tamaño de partícula.

La sedimentación o capacidad de las partículas para depositarse se define por medio de una relación que proporciona la velocidad

final con que se sedimenta la partícula bajo la influencia de la gravedad. Esta relación que se llama Ley de Stoke permite que el analista prediga las velocidades relativas de sedimentación (V_t) de varias partículas cuando se conocen sus diámetros (D) o establecer el valor del diámetro si se conoce el tiempo que tardó un aerosol concreto para sedimentar desde una altura dada. Suponiendo que las partículas son esféricas y que el aire ejerce un empuje de flotación constante resulta que

$$D = \frac{18\eta V_t}{(d_p - d_t)g} \quad \dots \text{Ec(9)}$$

Donde:

η es la viscosidad del aire (poises)

d_p es la densidad de la partícula (gramos por centímetro cúbico)

d_t es la densidad del aire (gramos por centímetro cúbico)

g es la aceleración de la gravedad (980 centímetros por segundo cuadrado)

En la **Tabla N°23** se recogen las velocidades de sedimentación que se obtienen por medio de esta expresión para partículas de diversos diámetros.

Tabla N°23. Velocidades de sedimentación de varias partículas 18°C

Diámetro de la partícula (μ)	Velocidad terminal de sedimentación		
	(pies/ h)	(km/h)	(m/s)
0,01	0,000036	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-9}$
1,0	0,360	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-5}$
5,0	9,24	$2,8 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-4}$
10,0	36,0	$1,1 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-3}$

Fuente: Peter Warner, Análisis de los Contaminantes del Aire, Paraninfo, España, 1981.

Se deduce de los datos que aparecen en la **Tabla N°23** que la capacidad de sedimentación de partículas muy pequeñas, con dimensiones casi moleculares, es tan pequeña que a efectos prácticos se puede suponer que tales partículas permanecen en suspensión en el aire e incluso son difíciles de arrastrar mediante lavado del aire como ocurre con la lluvia.

Como definición de trabajo se admite que las partículas de diámetro superior a 10μ son sedimentables mientras que las de diámetro inferior se pueden considerar que permanecerán en suspensión.

Los instrumentos que se dedican al recojo de uno y otro tipo de material particulado no suelen ser más que colectores físicos, químicamente inertes, cuya única misión estriba en permitir la medida del material recogido sin que importe su composición. Generalmente las macropartículas que se hallarán presentes serán diversos polvos minerales como óxidos metálicos, arenas, partículas de carbono, fibras de

ceniza de arrastre y polen. Se pueden recoger estas macropartículas empleando equipo que se basa en uno o más de los principios siguientes (12):

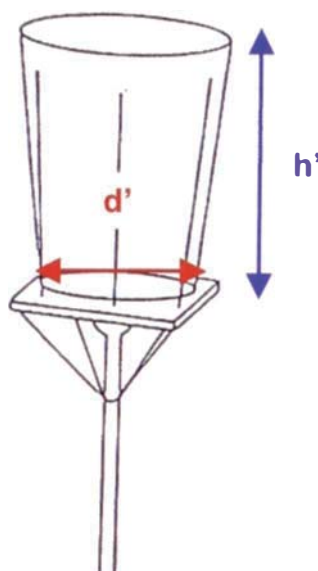
4.2.1.1 Toma de muestras de polvo por sedimentación bajo la fuerza de la gravedad (sedimentación de polvo)

Las partículas con diámetro superiores a 10μ que se sabe se sedimentan del aire y se depositan sobre las superficies horizontales se pueden recoger colocando sencillamente un recipiente abierto al aire libre sin obstrucciones por encima. Estos colectores generalmente se construyen de polietileno, vidrio o acero inoxidable puesto que sus superficies internas deben ser inmunes al descascarillado oxidativo que contribuiría al peso de la muestra. También los recipientes deben ser idénticos cuando formen parte de una misma red de estaciones de toma de muestra o cuando se desee hacer una comparación de los resultados. El recipiente se puede sujetar fácilmente con tres o cuatro barras o varillas de alambre dispuestas verticalmente sobre una tabla equidistante de un centro siguiendo la circunferencia del recipiente cilíndrico (véase la **Figura N°3**). El recipiente suele tener una altura algo más del doble que su diámetro en la base. Esta forma del recipiente evita el arrastre del polvo recogido por corrientes de aire posteriores y por las salpicaduras de una fuerte lluvia. El

recipiente para polvo típico está hecho de plástico y tiene entre 20 y 33 cm de alto (h') y 10 a 15 cm de diámetro en la base (d') con una ligera inclinación de las paredes de modo que es más ancho arriba que abajo.

Este procedimiento se rige por la Norma ASTM D1739-89 (ver **Anexo N°7**).

Figura N°3. Colector sencillo de polvo



Peter Warner, *Análisis de los Contaminantes del Aire*, Paraninfo, España, 1981.

Cuando se toman muestras en áreas grandes como una comunidad entera se debe colocar un colector de polvo por cada milla cuadrada. Por el contrario si lo que se desea es conocer la incidencia de una industria concreta o de un complejo industrial los colectores se deben colocar mucho más cerca, a un centenar de metros unos de otros.

Elección de la localización.- Se puede encontrar una descripción de los factores determinantes en la elección de

la localización de la toma de muestras en las especificaciones publicadas. El patrón de la ASTM comprende un cierto número de métodos para la caracterización de la muestra de polvo. Las consideraciones generales para elegir el lugar de toma de muestra son:

- 1) La estación debe estar libre de obstrucciones elevadas y lejos de la interferencia producida por fuentes locales como un incinerador o una chimenea.
- 2) La boca del colector de polvo debe estar al menos 2,5 m y no más de 15 m por encima del nivel del suelo con una elevación aconsejable de 6 m.
- 3) Cuando se toman muestras en áreas urbanas el colector de polvo no se debe colocar a menos de 10 veces la altura de la chimenea que este funcionando y no tan cerca de una pared, que el ángulo que va desde el colector a la parte superior de la pared o tejado sea de 30°.

Procedimiento de toma de muestra de polvo y determinaciones en esta.- A continuación se describen los aparatos de toma de muestra, el procedimiento de recolección y las determinaciones del polvo total recolectado así como de las fracciones soluble e insoluble.

Aparatos:

Colector de Polvo.- Sirve muy bien como colector una jarra ligera de polietileno como un recipiente para tener jugos en la nevera que tenga una tapa que se ajuste por presión o cualquier tipo similar de tapadera. Un soporte como el que se ilustra en la **Figura N°3** se puede comprar o improvisar.

Tamiz.- Se utiliza un tamiz de latón de acero inoxidable de 20 mesh.

Embudo buchner y matraz de filtración.- Se recomienda una superficie de filtración de 12,5 cm de diámetro.

Baño de agua o vapor de agua.- Debe tener espacios para calentar 4 y 12 platos de evaporación.

Estufa de desecación.- Para mantener un temperatura de 105 °C.

Frascos de Pesada.- De forma alta.

Aspirador.- Capaz de generar vacío para filtrar.

Recolección de la muestra:

Se debe restregar bien las paredes y el fondo de la jarra colectora. En los meses de verano se debe añadir un volumen conocido, como por ejemplo 500 ml de agua destilada que contenga 1 ppm (1mg/litro) de sulfato de cobre para inhibir el crecimiento de algas. Se lleva el recipiente colector a la localización para la toma de muestras de polvo, se quita la tapadera, y se monta en el

dispositivo de soporte. Después de una exposición de un mes de calendario con unos pocos días arriba o abajo, se tapa el colector con la tapadera de presión y se devuelve al laboratorio. Se debe tomar nota del número de días exacto de exposición.

Determinación del polvo total:

Se debe inspeccionar el contenido del recipiente y quitar objetos extraños como hojas, ramitas o insectos. Luego se lleva a cabo una separación previa de objetos grandes haciendo pasar el contenido del recipiente por el tamiz y se devuelve el tamizado al recipiente. Cuando al llegar al laboratorio el recipiente este seco, se le añade al menos $\frac{1}{2}$ litro de agua para facilitar la etapa de trasvase.

Utilizando una espátula con la punta cubierta de goma se raspan las paredes internas del recipiente para soltar el particulado seco. Luego con ayuda de la espátula y de un frasco lavador se transfiere cuantitativamente la porción del contenido a un plato de evaporación o un vaso de precipitados de 250 ml tarados. Se coloca el plato en el baño de agua o de vapor de agua hasta que quede solo un residuo húmedo. Luego se completa la evaporación en una estufa de desecación a 105 °C, se deseca y se pesa con error inferior al miligramo.

Determinación de las fracciones soluble e insoluble:

Se debe preparar y tamizar la muestra como se describió anteriormente, pero el filtrado del tamiz no se vuelve a poner en el recipiente. En cambio se coloca en un vaso ajustando el volumen a un litro mediante evaporación o por adición de agua destilada. El volumen ajustado se calienta hasta casi ebullición para garantizar la disolución de los compuestos solubles. Se enfría y se filtra con succión, de forma cuantitativa, el contenido a través de un dispositivo de filtro de Buchner con un papel tarado Whatman 41H. Se dobla el filtro sin apretar y se coloca en un pesafiltros y se seca en la estufa a 105 °C durante 1 h. Se enfría el pesafiltros en un desecador y se pesa. Este peso se reporta como **sólidos insolubles**.

Se transfiere el filtrado de la separación anterior de forma cuantitativa a un plato o vaso de evaporación de 250 ml. Se evapora como se describió en la sección Análisis de Polvo Total y se reporta el peso del residuo como **sólidos solubles**.

Cálculos:

Los sólidos del polvo se pueden expresar en gramos por metro cuadrado por mes (30 días). El peso de los sólidos totales debe ser igual a la suma de los pesos de los sólidos solubles (W_s) y de los sólidos insolubles (W_i).

$$\text{Polvo Total Sedimentable} = \frac{W_t \times 30 \text{ días}}{A_c \times N_d} \quad \dots \text{Ec (11)}$$

Donde:

W_t = sólidos totales en gramos ($W_t = W_s + W_i$)

W_s = sólidos solubles

W_i = sólidos insolubles

A_c = área de la boca de la jarra colectora (m^2)

N_d = número de días de exposición

Interpretación de los resultados:

En las áreas de abundantes lluvias que puede provocar el desbordamiento del colector se puede reducir la boca de la jarra colocando una tapadera de plástico con una abertura que tenga entre la mitad y dos tercios del diámetro original de la boca.

Además de determinar el peso de los sólidos solubles y de los sólidos insolubles se pueden hacer análisis químicos.

Probablemente la principal ventaja de la toma de muestra de polvo sea la facilidad con que se logran entre 1 y 5 gramos de material pesable sobre el que se pueden realizar diversos análisis químicos y físicos (microscópicos). Además el método es sencillo y barato y no precisa corriente eléctrica ni tiene partes móviles.

Algunas ventajas más son:

La recolección de polvo que sea representativo de una industria o comunidad dadas.

Detectar cambios en los procesos de una industria dada.

Entre los inconvenientes se cuentan la falta de precisión, y la incapacidad de distinguir episodios de deposición de polvo en gran cantidad debido a la integración de todo el peso de la muestra respecto del tiempo total de la toma de muestra de hasta 30 días.

(12)

4.2.1.2 Toma de muestra de polvo por filtración (macropartículas en suspensión)

La clase de partículas sedimentables que se miden a través de los colectores de polvo representa solo una fracción del polvo en suspensión en el aire. Las partículas arrastradas por el viento y levantadas desde el suelo que tenga un tamaño de partícula de menos de 10μ de diámetro conforme a la ley de Stoke tienden a permanecer arrastradas en una corriente de aire. Estas partículas se califican de "macropartículas en suspensión", esta clase de polvo contaminante del aire es respirable y ciertamente más perjudicial para el hombre que el particulado sedimentable de tamaño de partícula

mayor. **Por eso es preciso tomar muestras de aire de manera que haya discriminación entre estas dos clases de polvo contaminante.**

Elección de los medios de filtración.- Al elegir un medio de filtración se debe prestar atención a las consideraciones siguientes:

1) Tipo de las macropartículas que se tienen que recoger.

Las partículas finas recogidas en condiciones de humedad extremadamente altas pueden absorber humedad superficial. La humedad puede cegar un filtro normalmente higroscópico provocando una disminución del flujo, al mismo tiempo que un perjuicio a la bomba de aire. Además como las partículas pueden ser sólidas o líquidas, los compuestos orgánicos de peso molecular alto se pueden depositar formando una película y provocando de forma similar el atasco del filtro.

2) Naturaleza química del filtro. Algunas partículas orgánicas se pueden disolver de forma instantánea en determinados filtros sintéticos mientras que gases como NO_2 o SO_2 pueden atacar o descomponer algunos filtros de membrana. Por ejemplo, los filtros de fibra de vidrio no se deben utilizar para recoger

particulados en los que se tenga la intención de analizar sílice.

Gama de tamaños de las partículas de la muestra.- La mayoría de los filtros para muestreo del aire recogen partículas hasta un tamaño inferior límite entre 0,1 y 1,0 μ de diámetro.

Independientemente del tipo al que pertenezcan, la eficacia de los filtros para recoger partículas menores se incrementa a medida que progresa la toma de muestra, debido a una deposición creciente de partículas en la matriz filtrante.

La eficacia de recolección que de hecho poseen los filtros depende de un cierto número de variables:

- 1) Humedad relativa del aire ambiental.
- 2) Tamaño de partícula.
- 3) Forma de la partícula y rugosidad de su superficie.
- 4) Grado de aglomeración.
- 5) Carga estática de las partículas y del filtro.
- 6) Tiempo de contacto (espesor del filtro y velocidad del flujo de aire).
- 7) Temperatura ambiente.
- 8) Propiedades químicas del material del filtro.

Cantidad de muestra que se necesita para análisis.-

Como la mayoría de los métodos analíticos (si no todos)

precisan una muestra inicial que se pueda pesar, el límite inferior del tamaño de la muestra está frecuentemente fijado por la sensibilidad de la balanza analítica de que se disponga. Una regla general muy sencilla consiste en que se debe recoger suficiente muestra de aire para que proporcione una muestra de 1 a 10 mg en la matriz del filtro. Así pues, si se conoce la concentración aproximada de un determinado contaminante en el aire normal resulta fácil estimar el volumen de aire que se debe muestrear, así como, el tiempo que se necesitará para la toma de muestra.

Temperatura de las partículas o del aire que las rodea.-Cuando se tenga que tomar la muestra de aire a alta temperatura (por ejemplo 110 °C) como el que puede existir en las proximidades de procesos de oxidación o de tratamiento térmico será preciso utilizar un filtro resistente al calor o un filtro de fibra de vidrio o de poliolefina antes que uno de papel o de material sintético del tipo poliéster.

Clases y propiedades de los filtros.- Es esencial el conocimiento de los tipos generales de materiales de filtro para elegir adecuadamente uno para un tipo de material particulado concreto arrastrado por el aire.

Filtros de papel

Los filtros de papel ordinarios de laboratorio son apropiados para la recolección de aerosoles especialmente cuando se vaya a determinar el contenido en ión metálico del particulado y se pueden tolerar velocidades de flujo bajas. La gran caída de presión a través de los filtros de papel (celulosa) restringe su uso a la toma de muestras en atmósferas bastante concentradas ($>250 \text{ g/m}^3$) o en las proximidades de una fuente de partículas fuerte como es una acería o un área de almacenamiento de pólvora. También debido al bajo blanco, para iones metálicos, que presentan estos filtros ha hecho que resulten especialmente apropiados para la toma de muestras en plantas industriales más que en toma de muestras de aire ambiental.

Cuando se tenga que recoger un particulado relativamente refractario como puede ser sílice o caliza, los filtros de celulosa se pueden incinerar para producir una muestra seca pesable que se puede utilizar inmediatamente para análisis colorimétrico o de absorción atómica.

Filtros de membrana

La membrana filtrante se obtiene por compactación de un gel seco de ester de celulosa hasta formar un filtro de

poros cónicos diminutos de 1 a 2μ , que permite velocidades de flujo moderadas de muestra de aire a través de los poros, al tiempo que se produce la separación de las partículas que, atrapadas en las paredes internas del poro, forma remolinos en los propios poros. Las partículas así obtenidas se pueden observar al microscopio con facilidad y se pueden someter cómodamente a análisis químicos después de su extracción acuosa. Además los filtros se pueden volver transparentes por adición de un aceite de inmersión que tenga un índice de refracción de 1,5 de manera que el particulado retenido se vuelva visible desde cualquier ángulo que se observe.

La eficacia de la recolección es $> 99\%$ para aerosoles de tamaño inferior a una micra hasta un límite inferior de $0,2\mu$. Desgraciadamente la matriz de acetato con frecuencia solubiliza particulado orgánico con el subsiguiente colapso de las paredes cónicas de la estructura tridimensional del poro.

Aunque los filtros permisibles son más altos que los que corresponden a los filtros de papel, la velocidad de flujo está limitada a 10-20 cfm ($0,28-0,57 \text{ m}^3/\text{min}$).

Filtros de fibra inorgánica

Cuando se necesitan velocidades de flujo altas (20-60 cfm) para recoger una gran cantidad de muestra sin sacrificar mucho la eficacia de la recolección, los filtros de fibra de vidrio proporcionan un medio para filtrar hasta 1g de particulado en un tiempo relativamente corto (24 h). Estos filtros no contienen cementante orgánico y constituyen probablemente la matriz más adecuada para la recolección de un aerosol orgánico que se puede extraer a continuación con disolvente con suma facilidad. El contenido en ión metálico de las fibras de vidrio precisa una determinación cuidadosa en un blanco cuando se utiliza este filtro para recoger particulado que después se tenga que someter a determinación de ión metálico. Se deberán extraer con ácido entre 5 y 10 papeles limpios o si el espacio o el equipo en el laboratorio son limitados se puede determinar un blanco representativo extrayendo porciones periféricas y centrales de diversos filtros hasta conseguir el equivalente de 1 a 2 filtros. También se puede encontrar dificultad en recuperar el 100% de las partículas porque algunas de ellas se resisten a la extracción y se quedan atrapadas en la densa matriz del filtro.

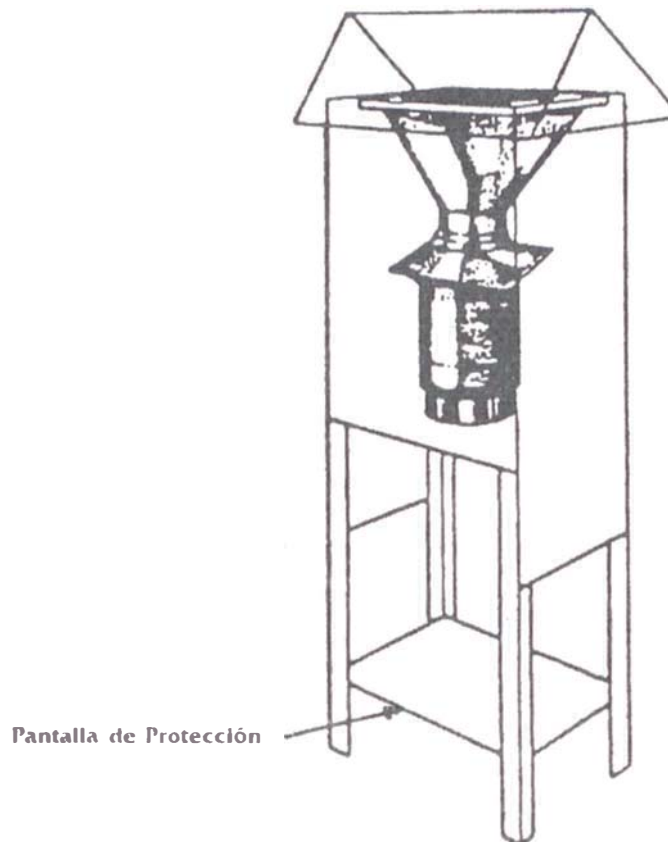
Toma de muestras de macropartículas en suspensión mediante filtración de alto volumen (Toma de muestras de alto volumen).-

Fundamento del método

La ley de Stoke aporta el enfoque básico para la recolección de particulado en suspensión. Cuando se opera en aire prácticamente estacionario, la geometría del dispositivo de toma de muestra de alto volumen (véase la **Figura N°4**) aprovecha el tejado inclinado que le cobija para obligar al aire, que entra en el dispositivo, a cambiar su dirección al menos en 90° antes de alcanzar el filtro horizontal.

Las partículas que siguen arrastradas por el aire antes de la filtración horizontal han cumplido con la definición para polvo realmente en suspensión –polvo que no sedimenta bajo la fuerza de la gravedad.

Figura N°4. Muestreador PTS de Alto Volumen



Fuente: Dirección de Asuntos Ambientales-MEM, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones, Perú, 1993.

Funcionamiento del dispositivo para la toma de muestras

El dispositivo de toma de muestras que se conoce corrientemente como un "Hi-Vol" (High-volume=alto volumen) está constituido como un motor semejante a un aspirador que se utiliza para llevar al área de filtración el aire mediante succión. El filtro puede ser:

- 1) Un disco circular de fibra de vidrio de 4 pulgadas de diámetro.
- 2) Un filtro de fibra de vidrio de 4x4 pulgadas.
- 3) Un filtro de fibra de vidrio de 8x10 pulgadas.

El filtro que se utiliza con mayor frecuencia es el filtro de 8x10 pulgadas que permite recoger una muestra de aire a un flujo comprendido entre 40 y 60 cfm (1,12-1,68 m³/min) durante **un periodo de toma de muestra nominal de 4 a 6 h y un tiempo de toma de muestra normal de 24 h**. Estas condiciones permiten la toma de muestra de 65 000 a 75 000 pies cúbicos (1 840,6 a 2 123,8 m³) de aire ambiental con la consiguiente extracción de aproximadamente ½ g de macropartículas en suspensión (aerosol). Este proporciona un peso de muestra muy sustancial, que simplifica notablemente la ulterior aplicación de análisis físico o químico.

Generalmente el motor se arranca y para por un simple medidor eléctrico de tiempo que se coloca en serie con el motor Hi-Vol. Los momentos de arranque y parada son asunto del operador aunque la EPA recomienda arranque y parada desde media noche a media noche, que es un período de 24 h en el mismo día del calendario. Este procedimiento se rige por la norma ASTM D4096-89 (ver **Anexo N°7**).

El National Air Sampling Network (la red nacional de toma de muestra del aire) en EEUU, opera dispositivos de toma de muestra de este tipo en todo el país, por periodos programados de 24 h cada sexto día. Este plan permite la

toma de muestra de aire en cada uno de los días de la semana en un período de 7 semanas y constituye el enfoque que se recomienda para la toma de muestras a largo plazo en el aire de una comunidad. Por otro lado, los estudios a corto plazo para determinar la variación día a día de los niveles de las macro partículas, puede requerir una toma de muestra de 24 h diarias continuas. Un programa así se puede cumplir en sus objetivos sin necesidad de cambiar manualmente los filtros a la media noche, mediante:

- 1) Utilización de un solo dispositivo de toma de muestras y cambiando el filtro al mediodía o cualquier otro momento más conveniente que la media noche.
- 2) Utilizando dos dispositivos de toma de muestra Hi-Vol uno al lado del otro con un dispositivo que ponga en marcha el segundo motor en el momento que para el primero a la media noche. Así el filtro expuesto se puede cambiar cómodamente en cualquier momento del día mientras que la segunda muestra de 24 h se está recogiendo.

Se utiliza un dispositivo medidor, como un rotámetro, para registrar el volumen de muestra que pasa por el filtro, para utilizar este dato después para calcular la masa de las macropartículas por volumen estático del gas

(microgramos de polvo por metro cúbico de aire de muestra). Usualmente se calibra primero el rotámetro del dispositivo Hi-Vol de toma de muestra particular utilizado y luego se aprovecha para medir el "flujo del aire inicial" por el medio filtrante limpio. Cuando se completa el tiempo de 24 hr (u otro período) de toma de muestra se hace otra lectura de rotámetro con el filtro expuesto y se determina el flujo medio.

Procedimiento

Se pueden resumir de la manera siguiente la sucesión de operaciones que supone la toma de muestra de macropartículas en aerosol utilizando este dispositivo:

- 1) Se coloca una sola hoja de filtro de fibra de vidrio tarada y desecada sobre la rejilla de soporte del dispositivo de toma de muestra Hi-Vol no más de 24 h antes del momento en que se tiene el propósito de comenzar la toma de muestra (la colocación del papel limpio con mayor antelación puede producir un depósito de hasta 5 ó 10 mg antes de comenzar la toma de muestra (la colocación del papel limpio con mayor antelación puede producir un depósito de hasta 5 ó 10 mg antes de comenzar la toma de muestra debido a corrientes de aire a través del dispositivo de toma de muestras).

- 2) Utilizando un rotámetro que se ha calibrado para medir el flujo de aire real a través del dispositivo de toma de muestras, se registra el flujo de aire de muestra inicial con el dispositivo de toma de muestra en marcha y el filtro nuevo en posición.
- 3) Ajustar el tiempo de comienzo a medianoche (u otra hora preseleccionada) del día del calendario que se ha decidido para la toma de muestras.
- 4) Volver dentro del día siguiente al de la toma de muestra y quitar cuidadosamente el filtro expuesto sin rasgar ni tocar la superficie de recolección. Cuando haga mucho viento o la inclemencia del tiempo lo aconseje el operador deberá escudar con su cuerpo o ropa el dispositivo de toma de muestras mientras procede a transferir el filtro.
- 5) Doblar el filtro dos veces a lo ancho o a lo largo y colocarlo en un sobre que se puede utilizar como superficie en que registrar convenientemente la información apropiada.

Filtros que se emplean en la toma de muestras de aire de alto volumen.- No se recomienda para la toma de muestras del aire ambiental la utilización de papeles de filtro corrientes para análisis de laboratorio. Las fibras de celulosa de gran diámetro que son irregulares y pueden

tener paredes aplastadas no ofrecen buen aerodinamismo para la recolección y recuperación de partículas muy pequeñas ($<0,5\mu$). Además, tales papeles de filtro no poseen la resistencia mecánica para soportar flujos de aire de 40 a 60 cfm que producen una caída de presión a través del filtro de 20 pulgadas de mercurio.

Un filtro preparado con fibras de vidrio entrecruzadas proporciona un medio poroso denso por el que una corriente de aire debe cambiar su curso al azar, haciendo posible que las partículas que arrastra choquen con las fibras del filtro y se queden atrapadas en ellas.

El filtro de fibra de vidrio patrón de 8x10 pulgadas está diseñado para recoger hasta 1,0-1,5 g de particulado. La operación por más tiempo del periodo de 24 h que se recomienda puede producir una muestra demasiado grande que puede cegar el filtro, dañar el motor y quizá provocar pérdida de muestra debido a que el viento pueda desprender el exceso de particulado suelto en el momento de recuperar el filtro.

De ordinario la eficacia de recolección del filtro de fibra de vidrio se considera como $>99,9\%$ para partículas cuyo tamaño se encuentre entre 0,1 y 10μ de diámetro.

Entre las pocas desventajas que se han puesto de manifiesto en el uso del filtro de fibra de vidrio están las

dificultades para recuperar particulado apropiado para la determinación de la distribución de tamaños (debido a la fractura de las partículas grandes en su colisión con las fibras) e interferencia en la determinación de los metales arrastrados por el aire (debido al contenido de ión metálico del filtro).

Antes de que un filtro se pueda utilizar para recoger una muestra de macropartículas, se debe secar y pesar. Aunque el secado en estufa a 110 °C permite una rápida preparación del filtro la subsiguiente operación de secado en la estufa después de la recolección de la muestra tiende a volatilizar la mayor parte de las macropartículas orgánicas e hidrocarburos. Por eso la EPA recomienda que para acondicionar el filtro se le equilibre durante 24 h a la humedad relativa de la atmósfera antes de pesar el filtro limpio y de volver a pesar el filtro expuesto. Aunque se sugiere la atmósfera de laboratorio, casi cualquier atmósfera reproducible de baja humedad puede servir, como puede ser la atmósfera en un desecador o recipiente seco de laboratorio. (12)

4.2.2 Posibles contaminantes del agua

Las aguas en condiciones naturales contienen materias extrañas en solución y suspensión, en proporciones muy variables, provenientes del terreno por donde discurren o de la atmósfera.

La atmósfera contiene, entre otros elementos, polvo en suspensión, materias disueltas y materias radioactivas, los que son lavados por las lluvias, transportándose aproximadamente el 80% de dichos elementos del aire hacia la superficie terrestre.

Las aguas superficiales son influenciadas por la naturaleza del terreno sobre el que discurren, llevándose en su recorrido los elementos o materias sueltas producidas por la naturaleza. Las aguas, así mismo, erosionan el suelo y arrastran partículas de diversa índole, tales como materiales de la corteza terrestre y minerales, cuyo contenido en exceso las hace impropias para beber. (13)

4.2.2.1 Contaminación de aguas por la actividad minera

Las lluvias contaminadas por el polvo o los humos provenientes de las fundiciones y minas van a los ríos y mares, del mismo modo que las aguas provenientes de las minas, del proceso de preparación del mineral, en especial de las concentradoras. Algunos productos químicos como por ejemplo los empleados para la flotación del mineral (tensoactivos), contienen sustancias que son altamente tóxicas y que son vertidas a los ríos, en la mayoría de los casos sin tratamiento o con tratamiento deficiente. Todo esto afecta la calidad de las aguas disminuyendo la luz, cambiando el pH o actuando como tóxico. La industria minero-metalúrgica emplea un volumen anual de agua igual a 413 994 000 m³, el cual se utiliza en diversas

etapas del proceso como: reactante, control de polvo, refrigeración y acarreo de residuos hacia lugares de confinamiento. Esta situación motiva la descarga de los "relaves", que afectan la composición de las aguas superficiales. Los relaves contienen en solución metales como el cobre, plomo, zinc, hierro, cadmio entre otros, resultantes de los procesos de neutralización y precipitación para la remoción de impurezas, superando en ciertos casos los límites permisibles estipulados en la Ley General de Aguas (DL 17752).

El volumen de descarga de relaves mineros que reciben los cursos de aguas es variable, de acuerdo al volumen de producción así como a la tecnología empleada durante la explotación, concentración, refinación y fundición. El curso de agua que presenta la mayor descarga de relaves en el Perú es el río Locumba, con más de 51 000 m³/año; sigue en este orden el río Rímac, con más de 16 000 m³/año, lo cual representa el 1,8% del volumen de su descarga natural. (13)

4.2.2.2 Tipos principales de los contaminantes del agua

Agentes patógenos

Desechos que requieren oxígeno

Nutrientes vegetales inorgánicos

Sustancias químicas orgánicas

Sustancias radiactivas

Calor

Sustancias químicas inorgánicas solubles en agua.- Los niveles altos de sustancias disueltas, como ácidos, sales y compuestos de metales tóxicos, como el mercurio y plomo, pueden hacer al agua impropia para beber, dañar a los peces y otra vida acuática, deprimir los rendimientos agrícolas y acelerar la corrosión del equipo que usa agua.

Sedimento o materia suspendida.- Las partículas insolubles de suelo y otros materiales sólidos inorgánicos y orgánicos que llegan a quedar en suspensión en el agua, son la mayor fuente de contaminación del agua, en términos de masa total. **La materia particulada suspendida enturbia el agua, reduce la aptitud de algunos organismos para encontrar alimento, reduce la fotosíntesis por plantas acuáticas y transporta plaguicidas, bacterias y otras sustancias nocivas. El sedimento del fondo destruye los terrenos o sitios de alimentación y desove de peces y obstruye y rellena lagos, estanques o rebalses artificiales, canales y bahías o bocanas de puertos. (13)**

Los procedimientos de muestreo y determinación de éste parámetro en laboratorio sigue los requerimientos del Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua (14) y de la norma

internacional 2540 D de APHA, AWWA y WPCF (ver **Anexo N°8**).

4.2.2.3 Características físicas y químicas de las aguas

Turbidez.- Se presenta en las aguas superficiales debido a la presencia de arcilla y sílice en suspensión, material orgánico e inorgánico, plancton y otros microorganismos.

Temperatura.- Es un parámetro característico de las aguas naturales y refleja las condiciones climáticas y ecológicas de las cuencas. Las aguas calientes que se vierten a los ríos alteran las condiciones ecológicas de las especies hidrobiológicas, incrementan la solubilidad, disminuyen la concentración de oxígeno disuelto y favorecen la multiplicación de bacterias.

pH.- El valor de pH de una muestra de agua expresa su tendencia a aceptar o donar iones hidrógeno en un rango de cero (muy ácido) a catorce (muy básico). El agua pura a 25°C es neutra y tiene un pH de 7; las aguas naturales están dentro del rango de 4 a 9 y son a menudo ligeramente básicas debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Una mayor desviación del pH normal del agua indica la contaminación de ácidos fuertes o de bases fuertes por vertimiento de aguas industriales. La regulación del pH es muy común en procesos

de tratamiento de agua y es usado para controlar la corrosión de un sistema hidráulico.

Conductividad eléctrica.- Es indicadora de la salinidad de las aguas. Este es un parámetro que depende del grado de concentración de sólidos totales disueltos (STD), de la temperatura y de la capacidad conductora de los materiales disueltos; este parámetro es medido a 25 °C (aunque también lo es a 20 °C) y se expresa en micromhos/cm.

Arsénico.- Este elemento está presente en el agua debido principalmente a la actividad minera y muy rara vez por causas naturales, aunque en concentraciones muy bajas; también se encuentra en ciertos insecticidas y herbicidas, los que pueden contaminar artificialmente las aguas con dicho elemento.

La dosis tóxica letal varía ampliamente según las distintas especies animales; para abastecimiento público el agua debe tener una concentración de arsénico menor de 0,1 mg/L, aunque es preferible su ausencia. (13)

La determinación del elemento arsénico se rige por la norma internacional Standard ISO 6595-1982 (ver **Anexo N°9**).

4.2.3 Posibles contaminantes del suelo

La contaminación de los suelos produce la pérdida progresiva de tierra productiva y espacios naturales, incrementándose los desiertos, produciéndose la erosión acelerada del suelo y pérdida de paisajes naturales.

En el Perú la minería es una de las principales actividades económicas generadora de divisas, y aunque en el país ha sido el primer en dar inicio a acciones dirigidas a la protección ambiental, es una de las causales principales de contaminación de suelo, como consecuencia de la deposición de sus relaves en el suelo (metales y acidez) y por la transformación paisajística (boquetes de extracción) favoreciendo la erosión del suelo. (13)

Grados de Contaminación

De acuerdo a estudios recientes, se han establecido algunos términos con los cuales se puede medir el grado de contaminación:

- Biodisponibilidad.- Es la asimilación del contaminante realizado por los organismos que habitan y conforman la biota del suelo.
- Movilidad.- Indica la regulación de la distribución del contaminante y por lo tanto, su posible transporte a otros sistemas, como por ejemplo: Los cuerpos de agua subterráneos y superficiales.
- Persistencia.- Es el término referido a la regulación del periodo de actividad de la sustancia contaminante o extraña en el suelo.
- Carga crítica.- Representa la cantidad máxima de un determinado contaminante aportado al suelo sin producir efectos nocivos. (13)

CAPÍTULO V EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN MAYOC

5.1 DELIMITACIÓN DEL AREA DE INTERÉS

Con el objetivo de evaluar experimentalmente la concentración de los contaminantes en los medios: agua, aire y suelo del entorno de los habitantes del antiguo fundo Glorieta de Mayoc se considerará el estudio a nivel local y se limitará a la zona de entorno de la relavera Mayoc con un radio de acción de 300 m aproximadamente.

5.2 DISEÑO DE LA RED DE MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS

Con el conocimiento de la Evaluación de Riesgos emitida por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud, el plan de monitoreo y muestreo es ajustado en su enfoque, de modo de proceder a una evaluación de la fuente, del medio físico (aire, agua y suelo) y de la forma de contaminación por arsénico de pobladores de las zonas de Mayoc y Daza del distrito de San Mateo de Huanchor. Esto debido a la ubicación tan próxima de la relavera Mayoc, en algunos casos a aproximadamente 20 m de las viviendas del antiguo fundo Glorieta de Mayoc.

5.2.1 Aguas para consumo humano de la población de Mayoc y Daza

En general, la población de la localidad de Daza es abastecida por el agua proveniente de las filtraciones u ojos de agua de la quebrada denominada Chaupi ubicada en la margen derecha del río Rímac. Esta agua es captada en un reservorio construido de material de concreto. La distribución de esta agua a las diferentes viviendas del poblado se realiza mediante una red de tuberías de polietileno. Para el caso particular de las viviendas de la zona de Mayoc, el agua proviene de la captación de un manantial en la margen izquierda del río Rímac y se almacena y distribuye de manera similar que en Daza.

Se decide tomar dos muestras de agua de consumo humano, una en la fuente y otra en un punto de abastecimiento como lo es una vivienda, particularmente de una persona afectada por la contaminación metálica. Ver **Tabla N°24** y **Croquis N°4**.

Tabla N°24. Puntos de muestreo de aguas

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h
ML1	Agua de alimentación del reservorio Daza	8699682	358210	3185
ML4	Agua de Caño de vivienda de Esther Santisteban Llata	8699208	358137	3124

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo.

Procedimiento.-

- 1) Se realiza la toma de muestra para la determinación de pH in situ por el método colorimétrico utilizando papel indicador universal marca PANPEHA de Riedel de Haen.
- 2) Siguiendo el Protocolo de monitoreo de calidad de agua del sector minero (14), se procede a la toma de muestra de agua en un frasco de polietileno con capacidad de 1 L. Esto para el análisis de sólidos totales en suspensión (TSS) y metales disueltos. El frasco se cierra herméticamente y se coloca en un recipiente refrigerado, sin usar preservante. Ver **Anexo N°8**.

5.2.2 Calidad de aire y material particulado sedimentado

Aún siendo período de lluvias se realiza el monitoreo de partículas totales en suspensión (PTS), así como el muestreo del polvo sedimentado sobre superficies protegidas, pues el tiempo limitado para el trabajo de campo no permite desarrollar la determinación de material particulado sedimentable.

De la información recopilada se tiene que, la dirección predominante del viento en la zona es de SW a NE, de acuerdo a esto se seleccionan los puntos de monitoreo con el criterio de antes (barlovento) y después (sotavento) de la posible fuente de contaminantes.

Se seleccionan puntos de monitoreo en las tres localidades que rodean el depósito: el primer punto en Mayoc (PTS1), el segundo

en Daza (PTS2) y el tercero en Tamboraque (PTS3). El punto de monitoreo de Mayoc corresponde a la vivienda de la Sra. Emilia Rosales (Familia Terrel-Rosales) quien presenta contenido de arsénico en la orina muy por encima de los niveles normales. Ver **Tabla N°25 y Croquis N°4**.

**Tabla N°25. Puntos de monitoreo de aire
(Fechas: 12,13 y 14.02.2001)**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h
PTS1	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón en Mayoc	8 699 116	358 124	3 092
PTS2	Vulcanizadora Matencio de Anatolio Matencio Soto en Daza	8 699 313	357 980	3 835
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza Romero-Puente Tamboraque III	8 698 737	358 087	3 055

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo.

Procedimiento.-

1) Para la determinación de PTS se usa un equipo, previamente calibrado (ver **Anexo N°10**), con las siguientes características:

Marca: STAPLEX

Modelo: TFIA-2, 220-240 VCA, 50-60 Hz

Régimen de Flujo de Muestra: 1,13 – 1,7 m³/min (1,45 m³/min)

Portafiltros: SH810, 8" x 10"

Cubierta: Aluminio

2) Siguiendo el Protocolo de monitoreo de calidad de aire y emisiones del sector minero (15) así como la norma ASTM D 4096 – 89 (ver **Anexo N°7**), el equipo de monitoreo se coloca sobre el techo de una vivienda a fin de que se encuentre expuesto a todas las direcciones del viento y pueda

abastecerse de energía eléctrica de 220 V, tomando en cuenta que no hayan emisiones importantes de material particulado o humo cerca del equipo. Es decir, el monitor debe estar en un sitio abierto, lejos de árboles, paredes, edificios, etc.; no deben haber árboles o estructuras más cercanas que dos veces la altura de la obstrucción o una distancia de 20 m. El filtro queda a aproximadamente 3 m sobre el nivel del suelo o 1,5-2,0 m sobre el techo. Si por seguridad se coloca en un recinto cercado, el filtro se ubicará a por lo menos 2 m de la cerca más próxima.

- 3) Se abre la cubierta del equipo de muestreo y se retira la placa frontal del muestreador aflojando las tuercas de mariposa y sacando los pernos. Se limpia cuidadosamente el tamiz de apoyo, la placa frontal y las superficies circundantes.
- 4) Se centra el filtro con el lado áspero hacia arriba sobre el tamiz de apoyo, de tal manera que la empaquetadura forme un cierre hermético en el extremo exterior del filtro cuando la placa frontal esta en posición. Cuando el filtro esta alineado y la placa frontal en su lugar, se ajusta las cuatro tuercas de mariposa lo suficiente para impedir fugas. Si se ajusta demasiado, el filtro puede pegarse o la empaquetadura puede resultar dañada de manera irreversible.

- 5) Se cierra la cubierta y se activa el conmutador del equipo. Se registra la información de identificación de la muestra: número y peso inicial del filtro, lugar de ubicación, operador de equipo.
- 6) Después de un período de 24 horas de funcionamiento normal del equipo, se desactiva el conmutador y se recupera el filtro, para lo cual se remueve la placa frontal y se retira del tamiz sostenedor, cogiéndolo con cuidado de los extremos, no de las esquinas. Se revisa el filtro para detectar signos de fugas de aire (polvo acumulado en el área de la empaquetadura) o de daños físicos que pudieran haber ocurrido durante el muestreo o después de este. El daño físico sufrido con posterioridad al muestreo no invalida la muestra si todas las piezas del filtro se colocan dentro del sobre.
- 7) Se dobla el filtro longitudinalmente por el medio, de tal manera que la parte expuesta quede dentro, asegurándose de que ningún elemento extraño entre en contacto con el depósito, y se le coloca en su respectivo sobre numerado.

Material particulado sedimentado

A fin de establecer comparaciones con la calidad de las partículas captadas en filtro, así como con la composición de suelos naturales, se procede al muestreo del polvo acumulado en zonas protegidas de las lluvias. Las tres viviendas seleccionadas presentan habitantes con contenido de arsénico en la orina por

encima de los valores normales y uno de ellos con contenido elevado de plomo en la sangre. Ver **Tabla N°26** y **Croquis N°4**.

**Tabla N°26. Puntos de muestreo de polvo sedimentado
(Fecha: 15.02.2001)**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h
PS1	Vivienda de Martina Segama Cochaches	8 699 386	358 219	3 124
PS2	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón	8 699 117	358 121	3 058
PS3	Vivienda de Esperanza Poviz	8 699 181	357 998	3 129

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo

Procedimiento.-

Para la determinación de PS se recolecta manualmente el material particulado de zonas protegidas de lluvias con ayuda de pinceles o brochas delgadas y papel blanco limpio, teniendo especial cuidado de tomar las partículas superficiales que efectivamente hayan sido transportadas por el viento y no sean residuos del material subyacente.

5.2.3 Suelos naturales en la zona contigua al Depósito de Relaves

Las zonas contiguas al depósito Mayoc se han usado principalmente para actividades de cultivo y pastoreo, estando entonces el suelo aledaño expuesto a la influencia de las actividades propias del depósito y constituyéndose además, como un medio de transmisión de contaminantes. Se seleccionaron dos puntos de muestreo uno más próximo a los cursos de efluentes del depósito de relaves y otro usado netamente para actividades agrícolas. Ver **Tabla N°27** y **Croquis N°4**.

**Tabla N°27. Puntos de muestreo de suelos naturales
(Fechas: 14 y 15.02.2001)**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h
MS4	Suelo de Cultivo próximo a Vivienda de Esperanza Poviz	8 699 116	328 025	3 148
MS5	Suelo de Cultivo y Pastoreo próximo a Pozas de Sedimentación	8 698 967	358 147	3 063

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo

Procedimiento.-

Considerando el procedimiento estándar de la EPA SOP 2012, con una pala metálica se excavan aproximadamente 40 cm de profundidad y se mezcla el material extraído, recogiendo aproximadamente 2 kg en una bolsa plástica, se trata de eliminar el aire dentro de la bolsa y se cierra.

5.2.4 Relaves del depósito de Mayoc

Se toman muestras de material suelto (fresco antes de su compactación) de la relavera obteniendo un compósito y también de un lodo asentado en el canal hacia el río Rimac para comparar con la muestra de relave seco que ha sido compactado y también con la muestra malla -200 de esta última, en su composición. Además se analiza la mineralogía de la muestra fresca así como su granulometría. Ver **Tabla N°28**.

**Tabla N°28. Puntos de muestreo de relaves
(Fecha: 13.02.2001)**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h
MS1	Compósito de material húmedo de relavera	8 699 013	358 051	3 062
MS2	Lodo a lo largo del canal que conduce efluentes al Rimac	8 698 967	358 147	3 063

MS3	Material seco de relave en la cuchilla del talud	8 699 208	358 137	3 124
MS1-200	Material de relave malla -200	8 699 013	358 051	3 062

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo

Procedimiento.-

Con una pala metálica se excavan aproximadamente 15 cm de profundidad y se mezcla el material extraído, recogiendo aproximadamente 5 kg en dos bolsas plásticas en un caso y 1 kg en una bolsa plástica en otros casos, se trata de eliminar el aire dentro de las bolsas y se cierra.

5.3 ANÁLISIS QUÍMICO Y RESULTADOS

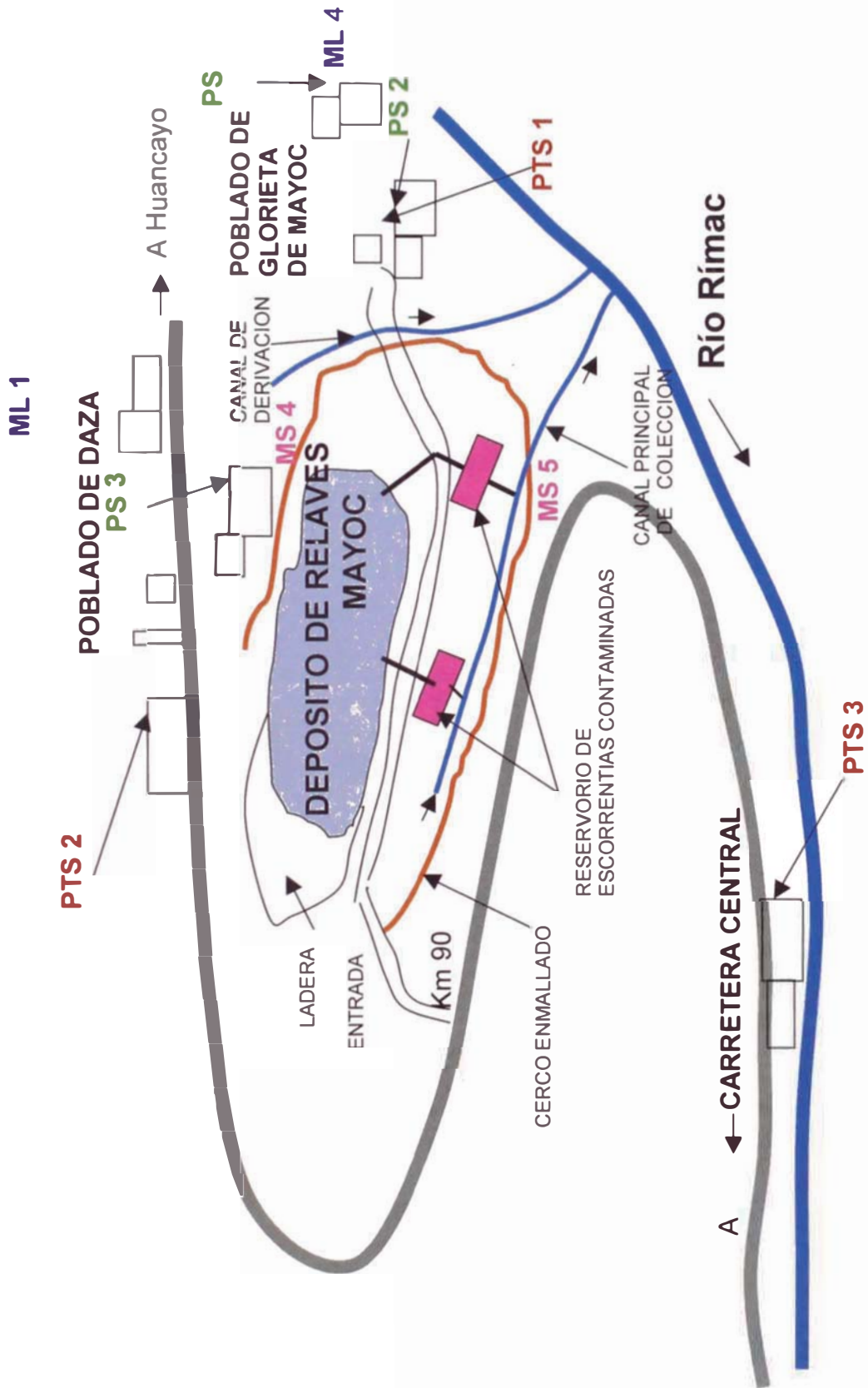
5.3.1 Aguas para consumo humano de la población de Mayoc y Daza

1) Inmediatamente recibidas las muestras de agua en el laboratorio tienen que ser filtradas siguiendo el procedimiento 2540-D de los métodos normalizados de APHA, AWWA y WPCF (Ver **Anexo N°8**). La diferencia de peso del filtro en mg antes (B) y después (A) de la filtración nos conduce a calcular:

$$\text{mg de sólidos totales en suspensión/L} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{Volumen de muestra, mL}}$$

2) En el líquido filtrado se procede a la determinación de metales disueltos, particularmente de As, usando el método espectrofotométrico con dietilditiocarbamato de plata (DEDTC-Ag) según el estándar internacional ISO 6595-1982 (E) (Ver **Anexo N°9**) cuya curva de calibración se presenta en el **Diagrama N°9**.

Croquis N°4. Ubicación de puntos de muestreo



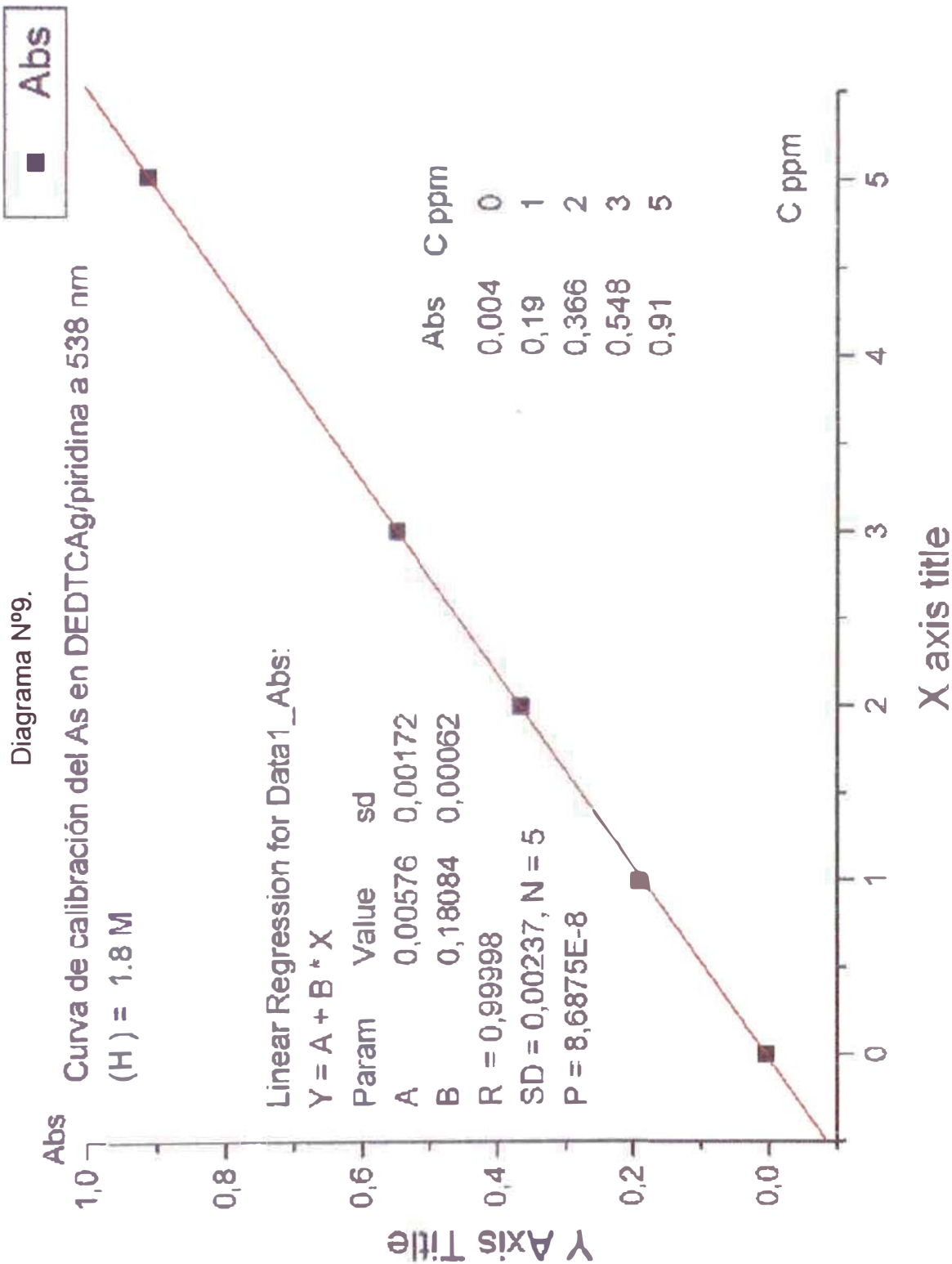


Tabla N°29. Resultados de análisis químico de aguas de consumo humano

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físico-químicos						
		N	E	h	pH	TSS (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)	
ML1	Agua de alimentación del reservorio Daza	8 699 682	358 210	3 185	8,0	17,0	<0,100	0,019	<0,010	<0,0002	
ML4	Agua de Caño de vivienda de Esther Santisteban Liata	8 699 208	358 137	3 124	8,0	12,0	<0,100	0,041	<0,010	<0,0002	
NMP	Ley General de Aguas-Clase I				5-9	--	0,05	5	0,10	0,002	
NPDWR	USEPA				6,5-8,5	--	0,015	5	0,01	0,002	

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo y Certificado N°10102095 de J. Ramón del Perú SAC

5.3.2 Calidad de aire y material particulado sedimentado

- 1) Pesando los filtros de fibra de vidrio antes y después de la operación del equipo de alto volumen y con los datos de campo de hora de encendido y apagado, así como el valor del flujo del equipo ($1,45 \text{ m}^3/\text{min}$) obtenemos la siguiente tabla:

Tabla N°30. Datos del monitoreo de PTS

	Tiempo Inicial	Tiempo Final	Tiempo de monitoreo (h)	Tiempo de monitoreo (min)	Peso Inicial	Peso Final (g)	PTS/muestra (g)
PTS1	12:24 m	12:24 m	24	1 440	3,4132	3,6562	0,2430
PTS2	5:40 m	3:40 m	22h 30min	1 350	3,3692	3,8738	0,5046
PTS3	4:55 m	2:22 m	21h 27min	1 287	3,3824	3,7131	0,3307

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo e Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

- 2) Multiplicando el tiempo de monitoreo por el flujo de muestreo obtenemos el volumen total de aire muestreado, luego dividimos el peso total de partículas colectadas sobre este volumen y obtenemos los resultados presentados en la **Tabla N°31**.

$$\mu\text{g de PTS}/\text{m}^3 = \frac{\text{PTS } (\mu\text{g})}{F (1,45 \text{ m}^3/\text{min}) \times t(\text{min})}$$

- 3) Luego de pesar los filtros para la determinación de PTS, se retira el filtro doblado del sobre en el que ha sido enviado y se le observa a fin de determinar si la muestra es adecuada para el análisis, luego se procede a la preparación de la muestra para la determinación de As por espectrofotometría de DEDTC-Ag.
- 4) Se corta una tira de 1,9 cm x 20,3 cm (3/4"x8") del filtro expuesto, utilizando para ello una plantilla y una cuchilla circular como se muestra en las **Figuras N°5 y N°6**, se dobla

la tira por la mitad dos veces y se coloca en un vaso de precipitados de 150 mL, se añaden 15 mL de HNO₃ 3M para cubrir completamente la muestra, se tapa con una luna de reloj y se pone a hervir cuidadosamente durante 30 minutos sin dejar que seque.

- 5) Después, se retira el vaso de precipitados de la estufa y deje enfriar hasta temperatura ambiente, se enjuaga la luna y los lados del vaso con agua destilada y se trasvasa la solución a una fiola. Se añade otra vez unos 40 mL de agua destilada al vaso de precipitados, se cubre con la luna de reloj y se deja reposar por unos 30 minutos. Se decanta la solución del filtro a la fiola y se enjuaga dos veces. Finalmente se enrasa la fiola y se toma una alícuota para seguir el procedimiento ISO 6595-1982 (E).

Material particulado sedimentado

Se prepara la muestra de polvo sedimentado como se indica en el procedimiento 2 para suelos (**Anexo N°11**) y luego se toma una alícuota para continuar con el método espectrofotométrico con DEDTC-Ag.

5.3.3 Suelos naturales en la zona contigua al Depósito

Se procede de manera análoga al caso anterior.

Figura N°5. Plantillas para seccionar tiras de filtro

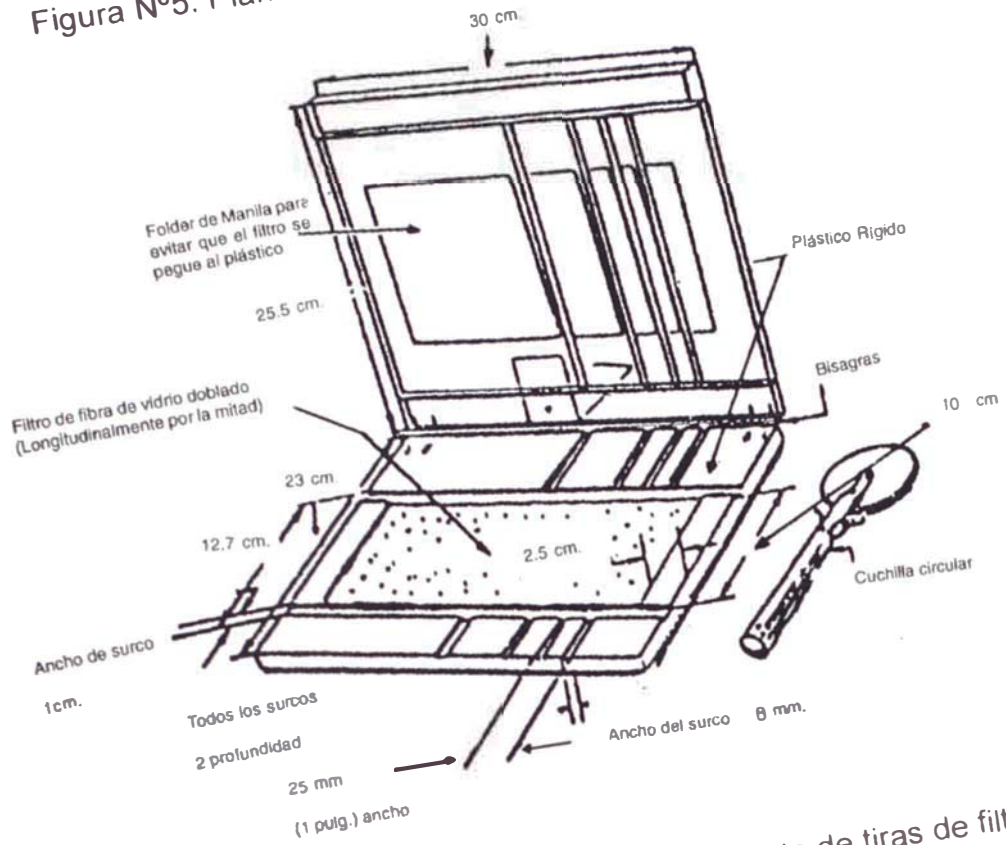


Figura N°6. Método sugerido para el seleccionamiento de tiras de filtro

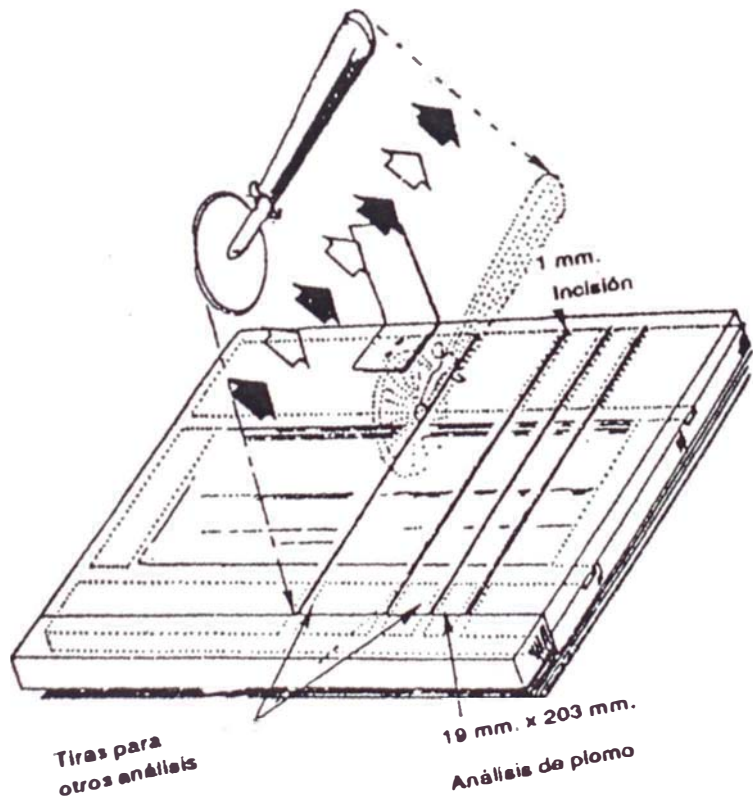


Tabla N°31. Resultados de análisis químico de monitoreo de Partículas Totales en Suspensión (PTS)

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físico-químicos					
		N	E	h	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Zn ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
PTS1	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón en Mayoc	8 699 116	358 124	3 092	116,4	0,10	0,36	0,09	0,0007	
PTS2	Vulcanizadora Matencio de Anatolio Matencio Soto en Daza	8 699 313	357 980	3 835	257,8	0,11	0,41	0,07	0,001	
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza Romero-Puente Tamboraque III	8 698 737	358 087	3 055	177,2	0,09	0,34	0,05	0,001	
NMP	Calidad de Aire				350	0,5	--	6,0	--	
NAAQS	USEPA/Referencial*				260	1,5	--	0,03*	--	

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo e Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

Tabla N°32. Resultados de análisis químico de monitoreo de Material Particulado Sedimentado (PS)

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físico-químicos					
		N	E	h	PS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	
PS1	Vivienda de Martina Segama Cochaches	8 699 386	358 219	3 124	--	952,1	2573,0	574,4	5,14	
PS2	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón	8 699 117	358 121	3 058	--	432,2	4287,0	385,2	1,13	
PS3	Vivienda de Esperanza Poviz	8 699 181	357 998	3 129	--	551,6	3816,0	1001,0	1,23	

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo e Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

Tabla N°33. Expresión de resultados de análisis químico de PTS en concentración peso/peso

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físicoquímicos			
		N	E	h	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
PTS1	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón en Mayoc	8 699 116	358 124	3 092	873,3	3118,88	788,98	5,88
PTS2	Vulcanizadora Matencio de Anatolio Matencio Soto en Daza	8 699 313	357 980	3 835	424,4	1586,28	260,91	4,06
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza Romero-Puente Tamboraque III	8 698 737	358 087	3 055	516,0	1914,0	288,00	5,37

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo e Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

Tabla N°34. Resultados de análisis químico de suelos naturales

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físicoquímicos			
		N	E	h	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
MS4	Suelo de Cultivo próximo a Vivienda de Esperanza Poviz	8 699 116	328 025	3 148	1690,0	877,5	358,5	2,71
MS5	Suelo de Cultivo y Pastoreo próximo a Pozas de Sedimentación	8 698 967	358 147	3 063	5053,0	3695,0	330,1	2,68
	Referencial*				1 200		1-40	

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo e Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

* I. Thornton y M. Farago, The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000

Relaves del depósito de Mayoc

Se desarrolla el tratamiento de la muestra y análisis químico usando la determinación volumétrica por bromatometría (Ver **Anexo N°12**), cuyos resultados se presentan en la **Tabla N°35**.

Utilizando métodos microscópicos y difracción de rayos X se obtiene la composición mineralógica del relave. Ver **Tabla N°36**.

Además se realiza el análisis granulométrico por tamizado.

Tabla N°35. Resultados de análisis químico de relaves

Clave	Identificación	Coordenadas UTM			Parámetros Físicoquímicos				
		N	E	h	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	
MS1	Compósito de material humedo de relavera	8 699 013	358 051	3 062	1 480	1 900	17 540	1,14	
MS2	Lodo a lo largo del canal que conduce efluentes al Rimac	8 698 967	358 147	3 063	2 310	2 940	25 610	1,26	
MS3	Material seco de relave en la cuchilla del talud	8 699 208	358 137	3 124	1 450	1 900	16 330	1,11	
MS1-200	Material de relave malla -200	8 699 013	358 051	3 062	2 780	3 610	24 820	--	

Fuente: Datos recogidos durante el trabajo de campo y Certificado N°10102094 de J. Ramón del Perú SAC

Tabla N°36. Resultados de análisis mineralógico de relaves

Especie mineral	Composición Química	Solubilidad	Abund. %
Arcilla: Como granos muy finos	$\text{Ca}_{0,24} \text{Na}_{0,01} \text{Mg}_{0,36} \text{Fe}_{0,02} \text{Al}_{1,75} \text{Si}_{3,87} \text{O}_{10} \text{OH}_{2,1,078} \text{H}_2\text{O}$	Parcialmente en ácidos	22
Yeso: Ocurre como granos muy finos diseminados en la muestra.	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	En HCl caliente	18
Muscovita: Correspondiente a micas finas de sericita.	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Insoluble	15
Cuarzo: Como granos subangulosos libres.	SiO_2	Soluble en HF	13
Microclina: Como granos finos alterándose.	KAlSi_3O_8	Insoluble	10
Ortoclasa: Granos finos alterándose.	KAlSi_3O_8	--	6
Anortita: Granos finos diseminados alterándose.	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Parcialmente en HCl	3
Pirita: Como granos libres.	FeS_2	Soluble en HNO_3	5
Escorodita: Como partículas finas alterándose.	$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Soluble en H_2SO_4	3
Carbonatos: Principalmente como granos finos de calcita.	CaCO_3	Soluble en HCl	2
Esfalerita: Granos finos.	ZnS	Soluble en HNO_3	0,3
Calcopirita: En proceso de alteración.	CuFeS_2	Soluble en HNO_3	0,3
Galena: Granos finos.	PbS	Se sulfata con HNO_3	0,3
Pirrotita: Como granos libres.	FeS	Soluble en HNO_3	0,3
Arsenopirita: Como granos finos libres.	FeAsS	Soluble en HNO_3	0,1
Cobres Grises: Como granos libres.	$\text{Cu}_{12}(\text{As,Sb})_4\text{S}_{13}$	Soluble en HCl	0,2
Hematita: Como granos libres.	Fe_2O_3	Lentamente sol. en HCl	0,2
Magnetita: Como granos libres.	Fe_3O_4	Lentamente sol. en HCl	0,2
Ilmenita: Asociado a la magnetita.	FeTiO_3	--	0,2
Biotita: Como hojas finas delgadas.	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	Poco soluble en H_2SO_4	0,1
Anatasa: Como granos finos.	TiO_2	Insoluble	0,1

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

PROYECTO: CANCHA DE RELAVES
 OBRA: _____
 SOLICITADO: DESARROLLO Y ECOLOGIA FECHA: FEB-2001
 REGISTRO: _____ ING. RESPONSABLE: ING. J. MARTINEZ
 UBICACIÓN: MAYOC-TAMBORAQUE, SAN MATEO TECNICO: Y.P. / J.F.V.M.
 CALICATA: D-9 MUESTRA: _____ PROFUNDIDAD (m.): _____

HUMEDAD NATURAL DE LA MUESTRA (%) :	18.170
PESO DE LA MUESTRA SECA (gr) :	2746.000
PESO DE LA MUESTRA LAVADA Y SECADA (gr) :	1238.400
PESOS DE FINOS LAVADOS (gr) :	141.000


TAMICES ASTM	DESCRIPCION	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO	
	ABERTURA (m.m.)			RETENIDO (%)	PASA(%)
3"	76.200				
2 1/2"	63.500				
2"	50.800				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				100.00
3/4"	19.050	23.20	0.84	0.84	99.16
1/2"	12.700	57.60	2.10	2.94	97.06
3/8"	9.525	64.00	2.33	5.27	94.73
1/4"	6.350	79.40	2.89	8.16	91.84
N° 4	4.760	39.60	1.44	9.61	90.39
N° 10	2.000	72.40	2.64	12.24	87.76
N° 20	0.840	63.40	2.31	14.55	85.45
N° 30	0.590	18.40	0.67	15.22	84.78
N° 40	0.426	44.00	1.60	16.82	83.18
N° 50	0.297	65.40	2.38	19.21	80.79
N° 60	0.250	77.00	2.80	22.01	77.99
N° 80	0.177	246.60	8.98	30.99	69.01
N° 200	0.074	354.00	12.89	43.88	56.12
FONDO	33.40	1.22	45.10	54.90
Limos 0.074mm-0.005mm.					
Arcillas < 0.005mm.					
Coloides < 0.001mm.					

D60	0. 10 5
D30	-
D10	-
Cu	-
Cc	-

Gravas	9.61
Arenas	34.28
Finos	56.12

Gruesa	0.84
Fina	8.76
Gruesa	2.64
Media	4.58
Fina	27.06

Martínez Ingeniería Geotécnica E.I.R.L.


 Ing° José A. Martínez del Rosario
 Titular Gerente
 Jr. Pedro Remy N° 198 - Urb. Ingeniería - S.M.P. ☎ Telf. 381-2561

CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Origen de la contaminación por arsénico en la zona de estudio

El arsénico está presente en los depósitos minerales de la zona, siendo el mineral más común la arsenopirita que además está asociada a oro y plata por lo que se constituye una mena económicamente explotable.

Razón por la que se registra actividad minera desde el siglo XIX, intensificándose esta actividad desde 1906 con la construcción de la Fundición Tamboraque.

En el proceso de fundición y/o tostación de minerales sulfurados con contenido de arsénico el metaloide se libera en la forma de trióxido de arsénico al estado gaseoso ($As_2O_{3(g)}$), muy volátil, el que por enfriamiento se deposita luego sobre los suelos como parte de material particulado. Este proceso se habría desarrollado por más de treinta años en la zona en estudio, por lo que es claro que todo el entorno presentaría contenidos de As_2O_3 .

La concentración de minerales por flotación en la planta Tamboraque viene generando relaves con contenidos de arsénico considerables en forma de las siguientes especies minerales: escorodita (3%), arsenopirita (0,1%) y cobres grises (0,2%), relaves que fueron almacenados en el Depósito de Relaves Mayoc.

Se puede notar, entonces, que la actividad minero-metalúrgica arriba mencionada sería la causante de la presencia del elemento arsénico en Mayoc.

6.2 Dispersión y transporte de arsénico en Mayoc

Los dos factores que más influyen en la dispersión y el transporte de los contaminantes contenidos en los suelos, son la meteorología y la topografía de la zona afectada. En el caso de la meteorología, por la accesibilidad a la información, se considera como datos relevantes para un estudio de contaminación los de la dirección y velocidad de los vientos. Para nuestro caso se tiene una dirección de vientos predominante de SW a NE con velocidades promedio bajas de aproximadamente 6 km/h debido a que la montañas características de una topografía abrupta, actúan como barreras para los vientos, atrapando masas de aire y evitando la dilución de los contaminantes.

El lugar de la actividad minera, incluyendo el depósito de relaves se encuentra **antes** del poblado de Mayoc considerando la dirección predominante de los vientos (barlovento), lo que permite el transporte de material particulado hacia la zona poblada.

Las precipitaciones pluviales en la zona son típicas de los andes, siendo estacionales y los cambios de temperatura de día a la noche son bruscos generando intemperismo en suelos y rocas que conlleva a la disgregación de partículas in situ. Estas partículas son transportadas por los vientos trasladando el arsénico hacia otras zonas.

Otro medio de dispersión y transporte de arsénico viene a ser los cursos de agua, para nuestro caso, orientado a la contaminación de los habitantes se tiene que el agua de bebida no es el medio contaminante por tener bajos niveles de concentración de arsénico.

6.3 Presencia de Arsénico en la zona de interés

Se ha determinado el contenido de arsénico en material particulado en suspensión y sedimentado obteniéndose valores altos. Sin embargo, en la expresión de PTS, μg por m^3 de aire, se tiene concentraciones bajas.

Aquí hay que destacar que la semejanza no es solamente en contenido de arsénico sino también en el orden del tamaño de partícula.

También se encuentran importantes cantidades de arsénico en los suelos, en concentraciones similares a las presentes en el material particulado.

6.4 Presencia de arsénico en los habitantes

Existen principalmente tres rutas por las que el habitante de Mayoc se habría expuesto a la contaminación por arsénico: aire, agua de bebida y alimentos. La primera y segunda han sido descartadas de acuerdo a los resultados de análisis químicos, pues están a niveles muy por debajo de los estándares límites. Entonces se entiende que la forma de contaminación de los habitantes de Mayoc es por la ingesta de alimentos. Los alimentos están siendo contaminados por el material particulado sedimentado disperso en toda la zona, incluyendo el interior de las viviendas. Por otro lado se estaría ingiriendo alimentos producidos en las

tierras de cultivo de Mayoc con altos contenidos de arsénico, particularmente tubérculos (y/o raíces) y lechugas.

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

7.1.1 Los habitantes de Mayoc, constituido por un total de 21 familias, vienen ingiriendo con su alimentación el elemento arsénico como contaminante, principalmente en su forma de trióxido de arsénico (As_2O_3). Este contaminante forma parte de los residuos peligrosos generados por la actividad minera en Mayoc desde tiempo atrás, que se ha acumulado en los suelos del entorno y que se dispersa y transporta como parte del material particulado por la acción del viento y precipitaciones pluviales, llegando hasta el interior de las viviendas y constituyéndose en un problema ambiental que produce efectos adversos a la salud de los habitantes, en particular de la población joven menor de 18 años que llega a aproximadamente 19 personas.

7.1.2 Considerando el medio físico aire se recogen muestras y analiza el parámetro Partículas Totales en Suspensión (PTS), que presenta concentraciones en la zona de estudio (116, 258 y 177 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que no superan los valores límites establecidos (260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); sin embargo, el contenido de arsénico en material particulado en suspensión (789, 261 y 288 mg/kg) así como en

material particulado sedimentado (574, 385 y 1 001 mg/kg) se presentan del mismo orden, superando los niveles de normas referenciales (1-40 mg/kg).

- 7.1.3 Otro medio de dispersión y transporte de arsénico son los cursos de agua, en este caso, orientándonos al medio de contaminación de los habitantes se ha muestreado y analizado el agua de bebida, resultando tener niveles bajos de concentración de arsénico ($<0,010$ mg/L), inferiores a los valores límites nacionales e internacionales (0,10 y 0,01 mg/L respectivamente).
- 7.1.4 Se ha podido determinar y confirmar la presencia de altos niveles de arsénico en suelos de la zona de estudio (358 y 330 mg/kg) en comparación con los niveles referenciales (1-40 mg/kg), constituyéndose en el medio de contaminación del habitante de Mayoc.
- 7.1.5 En el proceso de fundición y/o tostación de minerales sulfurados con contenido de arsénico, el metaloide se libera en la forma de trióxido de arsénico al estado gaseoso ($As_2O_{3(g)}$), muy volátil, que por enfriamiento se deposita luego sobre los suelos constituyéndose así como material particulado transportable. Este proceso se habría desarrollado por más de treinta años en la zona de estudio, por lo que todo el entorno presentaría contenidos de As_2O_3 constituyéndose el suelo degradado como una fuente del material particulado que al migrar provoca la exposición de los habitantes a elementos tóxicos como arsénico.

- 7.1.6 Además, la concentración de minerales por flotación en la Planta Tamboraque viene generando relaves con contenidos de arsénico considerables en forma de las siguientes especies minerales: Escoradita (3%), Arsenopirita (0,1%) y Cobres Grises (0,2%), relaves que fueron almacenados en el Depósito de Relaves Mayoc. Por lo que, en la actualidad el depósito de relaves Mayoc sin adecuado tratamiento, constituye otra fuente de material particulado que expone a los habitantes al arsénico.
- 7.1.7 Son las partículas menores (malla-200) de la relavera, las que presentan mayor contenido de arsénico y las que serían más fácilmente arrastradas por los vientos, convirtiéndose así en las más peligrosas para la salud humana.
- 7.1.8 Los dos factores que más influyen en la dispersión y el transporte de los contaminantes que contiene el medio físico suelo, son la meteorología y la topografía de la zona afectada. En nuestra zona de estudio se tiene una dirección de vientos predominante de SW a NE con velocidades promedio bajas de aproximadamente 6 km/h debido a que la montañas características de una topografía abrupta, actúan como barreras para los vientos, atrapando masas de aire y evitando la dilución de los contaminantes.
- 7.1.9 Así mismo, el emplazamiento de la actividad minera, incluyendo el depósito de relaves se encuentra **antes** del poblado de Mayoc considerando la dirección predominante de los vientos, lo que permite el transporte de material particulado hacia la zona poblada.

- 7.1.10 También, las precipitaciones pluviales en la zona son típicas de los andes, siendo estacionales y los cambios de temperatura de día a la noche son bruscos generando intemperismo en suelos y rocas que conlleva a la disgregación de partículas in situ. Estas partículas son transportadas por los vientos trasladando el arsénico hacia otras zonas.
- 7.1.11 La topografía y meteorología de la zona de Mayoc favorece la acumulación de contaminantes a nivel del suelo con la consiguiente dispersión de arsénico hacia las aguas del río Rímac, los suelos de cultivo y las viviendas.
- 7.1.12 Los alimentos están siendo contaminados por el material particulado sedimentado disperso en toda la zona, incluyendo el interior de las viviendas. Por otro lado se estaría ingiriendo alimentos producidos en las tierras de cultivo de Mayoc con altos contenidos de arsénico, particularmente tubérculos (y/o raíces) y lechugas.
- 7.1.13 La ruta de contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc es por la ingestión de alimentos, es en estos donde se deposita o impregna el material particulado; y además, en caso de provenir del cultivo local, presenta una carga del metaloide transferida desde el suelo.
- 7.1.14 Todavía no se tiene delimitado claramente el espacio geográfico que abarcarían los suelos contaminados por la actividad minera en más de treinta años. Tampoco se tiene claro la relación entre

la exposición al arsénico y los efectos a la salud de los habitantes de Mayoc.

7.2 RECOMENDACIONES

- 7.2.1 El estado debe considerar al poblado de San Mateo de Huanchor como una zona de riesgo para la salud a fin de implementar medidas de educación, higiene y control de la contaminación.
- 7.2.2 Las autoridades competentes deben elaborar e implementar un plan de emergencia para el tratamiento de las personas afectadas por arsénico en Mayoc, así como un plan de recuperación de suelos en el área de estudio.
- 7.2.3 Incluir dentro de la legislación ambiental el control del material particulado sedimentable y su contenido metálico en las actividades minero-metalúrgicas.
- 7.2.4 Actualizar y aclarar los niveles máximos permisibles para los parámetros fiscalizados en la legislación del sector minero.
- 7.2.5 Incluir valores límites de concentración de metales tóxicos, en particular de arsénico, para suelos en las normas legales del sector minero.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) D&E Desarrollo y Ecología SAC, Verificación de Condiciones Ambientales del Depósito de Relaves Mayoc, MEM, Perú, 2001.
- (2) Mario Samamé Boggio, El Perú Minero, Perú, 1979.
- (3) Minera Lisandro Proaño SA, Estudio de Impacto Ambiental para el Traslado y Disposición Final del Relave de Mayoc, Perú, 2002.
- (4) Kilborn Perú SA, Ingeniería de Diseño del Depósito de Relaves Mayoc, Perú, 1997.
- (5) I. Thornton y M. Farago, The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000.
- (6) F. Burriel Martí y otros, Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España, 1992.
- (7) G.S. Mankú, Principios de Química Inorgánica, Mc. Graw-Hill, México, 1990.
- (8) Akira Yazawa, Behavior of Nasty Species in Waste Gas Treatment, Japón 2000.
- (9) Nilda de Fernicola, Nociones Básicas de Toxicología, OMS, México, 1985.
- (10) Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, OIT, 1998.
- (11) Noel de Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Mc. Graw-Hill, México, 1997.
- (12) Peter Warner, Análisis de los Contaminantes del Aire, Paraninfo, España, 1981.
- (13) Raymundo Carranza Noriega, Medio Ambiente, Universidad Nacional del Callao, Perú, 2001.

- (14) Dirección de Asuntos Ambientales-MEM, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua, Perú, 1993.
- (15) Dirección de Asuntos Ambientales-MEM, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones, Perú, 1993.
- (16) Environmental Health Criteria 224, Arsenic and Arsenic Compounds, WHO, 2001.



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO
EN QUÍMICA**

Nombre: LIRA ESTHER VELIS PAJUELO

Título:

..... ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN POR
..... ARSENICO DE LOS HABITANTES DE MAYOC

Miembros del Jurado:

Decano o su representante:

Adolfo Le Rose Toro Gómez

[Firma]
(firma)

Profesor Asesor:

Marcelino Davila

[Firma]
(firma)

Profesor Especialista:

Ótilio Ache

[Firma]
(firma)

Luego de sustentado el Informe de Suficiencia y absueltas las preguntas, el Jurado otorgó el calificativo de:

APROBADA CON EXCELENCIA

tal como consta en el Libro de Actas N° 2, Folio N° 924

Dado en la ciudad de Lima en la fecha: 31/10/2002 a horas: 10:30

[Firma]
Decano



[Firma]
Director de la Escuela Profesional