

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**  
**SECCIÓN DE POS GRADO**



**FITORREMEDIACIÓN EN LOS SUELOS DE MAYOC,  
SAN MATEO, HUAROCHIRÍ - LIMA**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:**

**MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PRESENTADA POR:**

**PATRICIA ROSARIO LÓPEZ PINO**

**LIMA – PERÚ**

**2011**

## ÍNDICE GENERAL

<b>Objetivos</b>	xvii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	xviii
<b>1. Capítulo I: ASPECTOS GENERALES</b>	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del área de interés	5
1.3 Descripción de los procesos industriales en el área	8
1.3.1 UNIDAD MINERA CORICANCHA	8
1.3.2 PLANTA CONCENTRADORA TAMBORAQUE	8
1.4 Manejo de residuos: Depósito de relaves de Mayoc	9
1.5 Importancia del Plan de Cierre	15
<b>2. Capítulo II: CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL ARSÉNICO</b>	
2.1 Ciclo biogeoquímico del arsénico	17
2.2 Geoquímica, hidrogeoquímica y química del suelo	20
2.2.1 Geoquímica	20
2.2.2 Hidrogeoquímica	21
2.2.3 Química del Suelo	21
2.2.3.1 Características del suelo que definen la química del arsénico	21
2.2.3.2 Fenómenos de adsorción en el suelo	24
2.3 Biogeoquímica y geobotánica	24
2.3.1 Microorganismos en los suelos	25
2.3.1.1 Microorganismos tolerantes y resistentes a elementos químicos	25
2.3.1.2 Transformaciones microbiológicas en los compuestos de arsénico	26
2.3.2 Microorganismos en el sistema suelo-planta	26
2.3.3 Arsénico en plantas (Geobotánica)	27
2.3.3.1 Niveles de Arsénico en las plantas	27
2.3.3.2 Fitotoxicidad	27
2.3.3.3 Forma de ingreso del arsénico a la planta (Toma de arsénico)	28
2.3.3.4 Translocación	29
2.3.3.5 Metabolismo del arsénico	29

3.	Capítulo III: DISPERSIÓN Y NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DEL ARSÉNICO EN CUERPOS RECEPTORES DE MAYOC EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN	
3.1	Estándares de comparación en materia de salud y ambiente	31
3.1.1	Estándares Nacionales	31
3.1.2	Estándares internacionales y extranjeros referenciales	34
3.2	Contaminación de aire	35
3.2.1	La atmósfera	35
3.2.2	Métodos de Muestreo y análisis de los contaminantes del aire	35
3.2.3	Registros de monitoreos meteorológicos	36
3.3	Contaminación de agua	37
3.3.1	Contaminación de aguas por la actividad minera	37
3.4	Contaminación del suelo	37
3.4.1	Posibles contaminantes del suelo	37
3.4.2	Registros de muestreos de suelo	38
3.4.3	Registros de caracterización de relaves	39
3.5	Evaluación del arsénico en los cuerpos receptores de Mayoc	41
3.5.1	Inspección especial de Verificación de condiciones ambientales del Depósito de Relaves Mayoc	41
3.5.2	Registros de monitoreo (1999-2006) en cuerpos receptores de Mayoc	42
3.5.3	Rango de contenidos promedio de arsénico en cuerpos receptores	43
4.	Capítulo IV: EVALUACIÓN DEL ARSÉNICO EN LA POBLACIÓN DE MAYOC Y SUS EFECTOS	
4.1	Metabolismo y efectos del arsénico sobre el organismo humano	45
4.2	Zonas de evaluación del arsénico en la población de Mayoc	45
4.3	Resultados de las evaluaciones de arsénico en pobladores de Mayoc y zonas aledañas en San Mateo de Huanchor	47
4.3.1	Informes de evaluaciones realizadas por entidades estatales de salud	47
4.3.2	Informes de evaluaciones realizadas por entidades particulares	47
4.3.3	Informes de evaluaciones realizadas por entidades científicas con fines de investigación en medicina y salud	47
4.4	Casos detallados de evaluación de arsénico en pobladores de Mayoc	48
4.4.1	Informe de riesgos de salud en San Mateo de Huanchor, DIGESA, 2000	48
4.4.2	Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor	48
4.5	Normas legales nacionales sobre salubridad en el sector minero-metalúrgico	49

5.	Capítulo V: FITORREMEDIACIÓN EN SUELOS DE MAYOC CONTAMINADOS CON ARSÉNICO	
5.1	Descontaminación de suelos	50
5.1.1	Técnicas tradicionales de recuperación de suelos contaminados	50
5.1.2	Remediación de suelos por métodos biológicos - Biorremediación	51
5.1.3	Clases de técnicas de BIORREMEDIACIÓN	52
5.2	FITORREMEDIACIÓN (Remediación Verde)	53
5.2.1	Clasificación de las técnicas de Fitorremediación	54
5.2.2	Ventajas y Desventajas de la Fitorremediación	57
5.2.3	Plantas y depósitos minerales	58
5.2.3.1	Flora Metalofita	58
5.2.3.2	Clasificación de plantas según su respuesta a elementos ecotóxicos	59
5.2.4	HIPERACUMULADORAS	60
5.2.4.1	Historia y origen	60
5.2.4.2	Función medioambiental	62
5.2.4.3	Contribución de los HMA en la absorción y translocación de los metales pesados por plantas hiperacumuladoras	62
5.3	Fitorremediación en suelos de Mayoc contaminados con arsénico	63
5.3.1	Trabajo de Gabinete (Procedimiento propuesto)	64
5.3.1.1	Descripción de la zona o Hábitat a remediar	64
5.3.1.2	Descripción del suelo	65
5.3.1.3	Descripción de la Fauna	66
5.3.1.4	Descripción de plantas, tratamiento del tema equivalente al de la fauna	66
5.3.2	Trabajo de prospección: Búsqueda y elección de muestras de suelo y plantas ( <i>Procedimiento propuesto</i> )	67
5.3.2.1	Suelo	67
5.3.2.2	Plantas	68
5.3.3	Trabajo de Laboratorio ( <i>Procedimiento propuesto</i> )	69
5.3.3.1	Suelos	69
5.3.3.2	Plantas	70
5.3.4	Trabajo de campo - Pruebas de remediación ( <i>Procedimiento propuesto</i> )	72
5.3.4.1	Clasificación de los suelos, en zonas de mayor a menor grado de contaminación	72
5.3.4.2	Estudio de suelos en parcelas y/o macetas	72
5.3.4.3	Enmiendas del suelo	73
5.3.4.4	Variación estacional de la concentración de arsénico	75
5.3.4.5	Resistencia de la especie seleccionada a diferentes situaciones de estrés	76
5.3.4.6	Estrategias de fitorremediación	76
5.3.4.7	Técnicas de mejoramiento de plantas hiperacumuladoras	78
5.3.5	Trabajo experimental	80
5.3.5.1	Trabajo de Gabinete sobre situación en <i>Mayoc</i>	80
5.3.5.2	Trabajo de Laboratorio con plantas representativas de la flora de Mayoc	83
5.3.5.3	Resultados comparativos de la parte experimental	101

6.	Capítulo VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	103
7.	Capítulo VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
	7.1 Conclusiones	108
	7.2 Recomendaciones	110

## BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE ANEXOS

Nº		Pág.
1.1	Descripción del paraje de Mayoc (Topografía, Geografía, Clima, etc.)	115
2.1	Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	117
2.2	Química del arsénico - Química del arsénico en suelos	123
2.3	Microorganismos en los suelos - Transformaciones microbiológicas en compuestos de As - Micorriza	132
3.1	Monitoreos de aire, agua y suelos desde 1999 a 2006	136
4.1	Informes de evaluaciones realizadas a pobladores de Mayoc	152
4.2	Determinación de arsénico en orina	157
5.1	Métodos tradicionales de remediación de suelos	161
5.2	Descripción de una zona (Tipos de ecorregión, zonas de vida)	163
5.3	Tipos de suelo - Capacidad de uso - Coberturas	169
5.4	Características botánicas	175
5.5	Métodos de extracción de arsénico en suelos y plantas	176

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Nº		Página
1.1	Líneas de producción de la planta de beneficio Tamboraque	10
5.1	Diagrama de Pourbaix (E - pH de Arsénico)	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Nº		Página
2.1	Ciclo global biogeoquímico del arsénico	18
2.2	Ciclo local aire-suelo para el arsénico	19
4.1	Centros poblados expuestos al relave de Mayoc – DIGESA 2007	46
5.1	Procesos implicados en la fitorremediación de suelos contaminados	55
5.2	Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo	60

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Nº		Página
1.1	Vista de Mayoc de Norte a Sur, se aprecia dique del depósito de relaves	11
1.2	Vista del emplazamiento total de la relavera	11
1.3	Descarga directa de relave en la plataforma superior de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, 2005	12
1.4	Recrecimiento de la plataforma inferior de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, con una geometría de talud de 2H:1V – Sector Oeste, 2005.	13
1.5	Vista panorámica del depósito de relaves Máyoc, se aprecia el avance físico de la remoción, 2005.	14
1.6	Vista interior del depósito Máyoc, zona donde los relaves han sido removidos y trasladados, y en la cual se tomaron tres muestras de suelos, 2005.	14
4.1	Queratosis arsenicales palmoplantares y torácica	48
4.2	Dermatitis y queilitis actínica en pobladora de San Mateo de Huanchor	49
5.1	Cultivo en macetas (sunbags)	73
5.2	Composición de fotos descriptivas de las plantas (Primera etapa)	85
5.3	Composición de fotos descriptivas de las plantas (Segunda etapa)	98

## ÍNDICE DE PLANOS

Nº		Página
1.1	Accesibilidad a Mayoc	6
1.2	Ubicación geográfica de Mayoc	6
1.3	Ubicación de relaves en Mayoc y Tamboraque	7
1.4	Ubicación de zonas de deposición y traslado de relaves, Mayoc-Tamboraque - Chicla - Chinchán	16
3.1	Ubicación de los puntos de monitoreo de Agua y Aire (Cierre, 2006)	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Nº	Página
1.1	1
1.2	4
2.1	20
2.2	20
3.1	32
3.2	32
3.3	33
3.4	33
3.5	34
3.6	34
3.7	35
3.8	36
3.9	38
3.10	39
3.11	40
3.12	44
4.1	45
5.1	82
5.2	86
5.3	88
5.4	88
5.5	89
5.6	90
5.7	91
5.8	92
5.9	93
5.10	93
5.11	94
5.12	95
5.13	96
5.14	99
5.15	100
5.16	100
5.17	101
5.18	101
5.19	102
5.20	102

## ABREVIATURAS

1	APHA	American Public Health Association
2	ASTM	American Society for Testing Materials (Asociación Americana de ensayo de Materiales)
3	AWWA	American Water Works Association
4	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.
5	cfm	cubic feet per minute: pies cúbicos por minuto
6	Consultcont SAC	Consultores y Contratistas Generales SAC
7	DEDTC-Ag	Dietilditiocarbamato de plata
8	DGM	Dirección General de Minería
9	DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
10	DS	Decreto Supremo
11	EAI	Empresa de Auditoría e Inspectoría
12	EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de protección del medioambiente)
13	EQUAS	Environmental Quality Assurance Services SA
14	HDPE	High Density Polyethylene
15	Hi-Vol	Dispositivo de toma de muestras de aire de alto volumen
16	ISO	International Organization for Standardization
17	NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
18	ONERN	Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales
19	PM10	Material particulado fino, partículas suspendidas en su fracción respirable, de hasta 10 micrómetros en tamaño.
20	SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado
21	SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
22	SGS	Société Generale de Surveillance (Sociedad General de inspección, verificación y certificación)
23	STD	Sólidos Totales Disueltos
24	TMH	Toneladas métricas húmedas.
25	TMS	Toneladas métricas secas. Cuando se usa con respecto a concentrados, excluye el agua contenida en el concentrado.
26	TSS	Sólidos totales en suspensión
27	UP	Unidad de producción
28	USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
29	UTM	Universal Transverse Mercator – Sistema de coordenadas basado en una red de cuadrículas o rejilla. Lleva el nombre del cartógrafo Gerardus Mercator.

## 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       $(\text{H}_3\text{AsO}_4)$  Ácido poco menos fuerte que el  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .
4. Ácido ortoarsenioso       $(\text{H}_3\text{AsO}_3)$  Ácido muy débil de As (III).
5. Arsenatos      Compuestos de As (V). En aguas oxidantes, el arsénico se encuentra en la forma de arseniatos.
6. Arsenitos      Compuestos de As (III). En aguas reductoras, el arsénico se encuentra en la forma de arsenitos.
7. Arsenobetaína       $(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{COOH}$ , forma orgánica del arsénico. Los peces y crustáceos son los que más contenido de arsénico presentan generalmente en forma de arsenobetaína, 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,  $\text{As}_4\text{O}_6$ , 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 ( $\text{FeAsS}$ )
11. Arsina       $\text{AsH}_3$ , hidruro de arsénico, gas venenoso.
12. Metilarsina      Derivado metilado de la arsina,  $\text{CH}_3\text{AsH}_2$
13. Óxido de trimetilarsina       $(\text{CH}_3)_3\text{AsO}$
14. Pentóxido de arsénico       $\text{As}_2\text{O}_5$ , 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       $\text{As}_2\text{O}_3$ , 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.
10. Ganga Materia inútil que envuelve y acompaña a los minerales.
11. Hi-vol sampler Equipo que aspira grandes volúmenes de aire y retiene las partículas en un filtro. (Muestreador de alto volumen)
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.

## RESUMEN

El presente trabajo de Tesis de Maestría en Ciencias con Mención en Minería y Medio Ambiente, tiene por objetivo determinar los niveles de exposición al arsénico en cuerpos receptores de Mayoc y evaluar la presencia de arsénico en los habitantes de Mayoc.

Para este fin, mediante una revisión bibliográfica, se recopila información existente sobre la zona de Mayoc, la descripción de las actividades mineras en la zona y la historia del depósito de relaves a través de las inspecciones realizadas, debido a las quejas de la población; los registros de muestreo y monitoreos en cuerpos receptores, aire, agua y suelos de Mayoc y publicaciones médicas sobre la salud de los pobladores de la zona.

Con toda esta información se evalúa la dispersión del arsénico en los suelos de Mayoc y alrededores, en sus pobladores y se propone el procedimiento alternativo de FITORREMEDIACIÓN *como un procedimiento de limpieza de suelos usando plantas*. En la parte experimental se ensaya con algunas plantas propias de la flora aledaña al depósito de Mayoc, pero adquiridas en los mercados de Lima, en pruebas de **sorción de arsénico** – en sus formas de arsenito y arseniato en soluciones acuosas – en diversas modalidades como la Rizofiltración (en lugar de suelo las plantas se cultivan en invernaderos con las raíces en agua) y fitoextracción (por absorción del arsénico en plantas, mediante el regadío en macetas).

El uso de esta técnica, aplicada más adelante en el campo, sería una herramienta alternativa para reducir o eliminar contaminantes del suelo, específicamente el arsénico. Más ampliamente, podría ser una forma de controlar la exposición a la contaminación de los suelos de Mayoc y alrededores.

## SUMMARY

The present work performed as Master of Sciences with mention in Mining and Environment Thesis has as goals the determination of exposure levels to arsenic in reception bodies of Mayoc and to evaluate the presence of this chemical element in the inhabitants of Mayoc, in order to propose a control procedure of the arsenic's dispersion in Mayoc's soils and surrounding area.

With this objective a bibliographic review is performed and also a compilation of information related to the area of Mayoc, a description of the mining activities of the zone, the standards in environmental and health matters, the sampling records and monitoring in Mayoc's reception bodies (air, water and soil) that can let evaluate the presence of arsenic in the settlers.

Finally, with all this information a proposal is set out in order to control the arsenic scattering in Mayoc's soils and outskirts. A phytoremediation procedure is proposed and some plants are experimentally tested in trials of arsenic sorption – in aqueous solution forms of arsenite and arsenate – in diverse methods such as rhizofiltration (instead of in soil the plants used for cleaning are cultivated in greenhouses with the roots under water) and phytoextraction (by arsenic's absorption in plants watered in flowerpots).

Using this technique in land, it will be an alternative tool to reducing or removing pollutants in soil, arsenic specifically. It could be the form to controlling the exposure the Mayoc's soils and surroundings to pollution.

## **OBJETIVOS**

1. Evaluar los niveles de exposición al arsénico en cuerpos receptores de Mayoc
2. Evaluar la presencia de arsénico en los habitantes de Mayoc
3. Proponer la Fitorremediación como procedimiento de limpieza o mecanismo de control de la dispersión de arsénico en los suelos de Mayoc y alrededores.

## INTRODUCCIÓN

La labor profesional en el campo de la fiscalización ambiental en el sector minero-metalúrgico, permite el conocimiento de algunos casos en los cuales los pobladores de las zonas aledañas a una zona industrial, se consideran afectados en su salud, debido a los procesos llevados a cabo en dicha zona.

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 en Huarochirí, se atribuyen a la migración del material particulado contenido en el Depósito de Relaves Mayoc, localizado en las proximidades de la localidad. Este problema motiva el reclamo de la población y después de 7 años el relave es finalmente trasladado, en el año 2005, a otro lugar, a unos 200 metros más abajo del depósito inicial.

Este es el punto de partida del presente trabajo, enfocado en las características contaminantes y toxicológicas del arsénico producido por la actividad minero-metalúrgica. La investigación bibliográfica se centra en los informes de monitoreo de contaminantes en agua, aire y suelo y en la salud de los pobladores de Mayoc, para evaluar la dispersión del arsénico en los cuerpos receptores y su impacto en la salud de las personas afectadas.

Se introduce el concepto de FITORREMEDIACIÓN como un procedimiento alternativo para reducir o eliminar contaminantes en agua o suelos, utilizando plantas.

La motivación de este trabajo es que en un futuro no muy lejano, sea el ser humano, en su salud y bienestar, el parámetro principal para evaluar la **sustentabilidad** de toda actividad industrial o artesanal.

## CAPÍTULO I

### 1. ASPECTOS GENERALES

#### 1.1 Antecedentes

Con la construcción del Ferrocarril Central del Perú en 1870 se abre paso al desarrollo de la minería en la provincia de Huarochirí. En la **Tabla Nº 1.1** se hace un resumen de las empresas que iniciaron la actividad minero-metalúrgica en la zona central del Perú.

**Tabla Nº 1.1.-** Desarrollo de la minería en la zona central del Perú

Empresa	Actividad	Año
Peruvian Mining Smelting & Refining Co.	Fundición Río Blanco	
Cía. Minera Lizandro Proaño	Mina y Fundición Tamboraque	1875
Backus y Johnston Co.	Mina y Fundición Casapalca	1889
Actual Complejo Metalúrgico de la Oroya	Fundición de cobre - plomo	1922 - 28

Fuente: SVS Ingenieros S.A., Plan de Cierre Depósito de Relaves de Mayoc, Lima – Perú, 2005

La puesta en marcha de la fundición de La Oroya hizo que las fundiciones de Río Blanco, Casapalca y Tamboraque dejaran de operar en el año 1934, tal como queda consignado en el ***Boletín del Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú*** de aquella época.

La Mina Tamboraque fue posteriormente reabierta y entre los años 1940 - 1996 funcionó en la unidad minera una planta concentradora de flotación de minerales de Pb, Cu y Zn, con una capacidad inicial de 50 TPD que luego fue ampliada a 200 TPD.

En 1996, la empresa Negociación Minera Lisandro Proaño S.A. (NMLPSA) presenta el Estudio de Impacto Ambiental para el “Proyecto Tamboraque” de ampliación de la capacidad de la mina y planta concentradora de 200 a 600 TM/día.

En dicho Estudio se considera la ampliación de la *relavera Triana* para la disposición de los relaves de la Planta Concentradora Tamboraque, estimando en dos años su vida útil (1997-99). Se indica el desarrollo de un nuevo depósito de relaves para los siguientes ocho años (1999-2006), se contempla su construcción en la zona de Mayoc. **(30)**

***La mención del depósito de relaves de Mayoc es de capital importancia en el presente trabajo, ya que es el origen de los reclamos de los pobladores de Mayoc.***

El fundo Glorieta de Mayoc, de 6,12 ha, en donde se ubica el Depósito de Relaves Mayoc es adquirido por Minera Lisandro Proaño S.A. a Centromín Perú S.A. con fecha 18.08.97. Posteriormente la firma Kilborn S.A. encarga a la empresa consultora Tecnología y Proyectos S.A. (TECPROSA) el diseño del depósito de relaves de Mayoc, en Diciembre de 1997.

La Dirección General de Minería del Ministerio de Energía y Minas (DGM) emite informe de aprobación de la reducción de área de relavera de 4,1 a 3,9 ha y ampliación de la Planta Concentradora de 21 a 27,9 hectáreas y autoriza a la empresa NMLPSA a ampliar la capacidad de producción de la planta de beneficio "Concentradora Tamboraque" de 210 a 600 TPD, según el estudio efectuado por Consult Control S.A.

El Ministerio de Energía y Minas en Agosto 1998 expide la licencia a NMLPSA para operar el depósito de relaves de Mayoc de Setiembre 1998 a Setiembre 2000, Los relaves se transportan en camiones desde la nueva planta concentradora Tamboraque hasta el depósito, siendo esparcidos y compactados en dicho lugar con un tractor.

*La operación del depósito genera molestias entre los residentes de los poblados de Glorieta de Mayoc y Daza, ubicados a 75 m NE y 100 m NW, respectivamente del depósito. Se forma el **Comité de Defensa del Medio Ambiente** (o Comité de afectados por la minería, Mayo 1999) a cargo de la Junta Vecinal. Los reclamos formulados dan lugar a que la Municipalidad de San Mateo de Huanchor presente una denuncia ante el Juez Mixto de Huarochirí contra la empresa NMLPSA por contaminación ambiental.*

A partir de esta denuncia se inicia una serie de inspecciones por parte de las autoridades competentes, durante los años 1999 y 2000. De las inspecciones ambientales con tres diferentes empresas, sólo una de ellas señala al depósito como fuente de contaminación. El Ministerio de Salud a través de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) realiza *muestras de sangre y orina a los pobladores de Glorieta de Mayoc y zonas vecinas*, para determinar los niveles de exposición a metales pesados (Pb, Cd, **As** y Hg).

En el año 2001 Wiese Sudameris Leasing S.A. (WSL) asume la titularidad de la operación minera y de beneficio y constituye la empresa Concentradora de Minerales Fortuna S.A.C. la misma que encarga la administración de la Unidad Minera Tamboraque a la empresa Larizbeascoa y Zapata S.A.C. (L&Z). El mismo año L&Z aplica sobre la superficie expuesta del depósito, un polímero supresor de polvos (Geolock) para restringir y controlar las emisiones, sin embargo persisten los reclamos de la población. **(30)**

En febrero del 2001 el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) ordena una Inspección Especial para verificar las condiciones ambientales de Mayoc y como consecuencia de la misma, en Marzo del mismo año, ordena la **paralización definitiva de la disposición de relaves mineros en el depósito de Mayoc**, dando un plazo de 60 días para presentar el estudio definitivo para el retiro del relave. **(9)**

En el año 2002 se construye un cerco perimetral para impedir acceso a terceros al depósito de relaves y se coloca sobre este una capa de 200 mm de suelo local que se ha revegetado con plantas de la localidad. Las quejas y denuncias de la población continúan.

En el año 2003 L&Z decide trasladar relaves de Mayoc hacia los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, lo que fue impedido por el Ministerio de Energía y Minas por no contar con el Estudio de Impacto Ambiental correspondiente.

En Abril del 2005 Wiese Sudameris Leasing S.A. presenta el Plan de Cierre del Depósito de Relaves Mayoc a la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (MEM).

En mayo del 2005 WSL presenta la absolución de las observaciones. El 06 de junio de 2005 se **aprueba el Plan de Cierre del depósito de relaves de Mayoc** (DGM-MEM).

Se designa a la Empresa D&E para realizar el Examen de verificación de la implementación del Plan de Cierre del depósito de relaves Mayoc (Abril 2005).

Este Examen Especial se realiza quincenalmente durante tres meses, a partir de octubre del 2005, hasta culminar las actividades de **traslado de relaves del depósito Mayoc a los depósitos N° 1 y 2** de Tamboraque. D&E presenta 05 informes al Minem.

***Después de años de reclamos los relaves de Mayoc fueron trasladados a los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque en el año 2005.***

La Compañía Minera San Juan (Perú) S.A. subsidiaria de la empresa Canadiense GOLD HAWK Resources Inc., adquiere la mina Coricancha (Marzo 2006).

En Abril del 2006 se designa a la Empresa D&E para la **Auditoría Ambiental de Verificación de la Ejecución del Plan de Cierre del Depósito de Relaves Mayoc**.

En consecuencia la Auditoría Ambiental se realiza los días 06, 07 y 08 de abril de 2006 a las instalaciones de los depósitos de relaves de Mayoc y Tamboraque. **(8)**

Con el traslado de los relaves del depósito de Mayoc se culmina el cierre de este y se inicia el plan de cierre de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque.

Este hecho obliga a definir otro lugar para depositar los relaves, ya que prosiguen los procesos minero-metalúrgicos en Coricancha y Tamboraque. Se escoge a la quebrada de Chinchán (Chicla), ubicada a unos 30 kilómetros al este de San Mateo de Huanchor,

En el año 2008 por Decreto Supremo D.S. 050-2008 PCM se declara en emergencia el Cerro Tamboraque y se ordena el traslado de los relaves de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque al Depósito Temporal Chinchán Norte en Chicla. Luego serán transportados al Depósito de Relaves Chinchán Sur para ser dispuestos en forma definitiva, compactados. Finalmente se procederá al desmontaje de la impermeabilización de la relavera temporal y se iniciará la construcción del Depósito de Relaves Chinchán Norte.

***Actualmente los pobladores aledaños a Chinchán no quieren que los relaves sean depositados en los lugares indicados. El problema de los relaves y la reacción de los pobladores de las zonas aledañas a las relaveras, se traslada de un lugar a otro.***

***La situación sigue siendo la misma.*** En la **Tabla N° 1.2** se resume las fechas más resaltantes de la historia del depósito de relaves de Mayoc.

**Tabla N° 1.2.- DEPÓSITO DE RELAVES DE MAYOC**  
**Secuencia cronológica de operación e inspecciones**

<b>Fecha</b>	<b>Actividades</b>
03-X-1996	EIA "Proyecto Tamboraque", ampliar capacidad de 200 a 600 TM/día. Indica que <b>depósito de relaves</b> es en Mayoc (Informe N° 441-96-EM-DGM).
Diciembre 1997	<b>Diseño del depósito de relaves de Mayoc</b> , Consultora Tecnología y Proyectos S.A. (TECPROSA) (Informe N° 469-98-EM-DGM/DPDM).
Ago. 1998	<b>Licencia para construir y operar el depósito de relaves</b> (DGM).
Mayo 1999	<b>Denuncia de Municipio San Mateo</b> : inspección de EAI M&S Especialistas Ambientales EIRL. (Informe N° 781-99-EM-DGM-DFM/DFT).
Junio - Julio 1999	Dirección General de Asuntos Ambientales y Dirección de Promoción Minera (DGM) <b>recomiendan paralizar</b> Planta Concentradora y <b>Relavera</b> .
Años 1999-2000 <b>Inspecciones ambientales</b>	<b>EQUAS</b> lo califica de <b>fuentes de contaminación</b> (Agosto 1999). <b>Consultcont</b> reitera <b>relavera no contamina</b> . Informe de Verificación de cumplimiento de recomendaciones (Marzo 2000). <b>SGS</b> afirma que efluentes líquidos y calidad de aire cumplen con estándares (Informe de verificación de cumplimiento de normas ambientales Julio 2000). <b>DIGESA</b> efectúa estudios en agua y pobladores (1999) y <b>muestreos de sangre y orina a pobladores de Mayoc</b> y zonas vecinas (2000).
Noviembre 2000	DGM autoriza a Planta de Beneficio funcionar con capacidad ampliada a 600 TMD y reanudar <b>operación de la relavera</b> (RD 170-2000-EM/DGM).
Enero 2001	DIGESA: revela que la gente <b>muestra signos de contaminación (As-Pb-Hg)</b> . <b>Pobladores exigen cierre definitivo</b> y traslado de relaves a tajos de mina Coricancha, como relleno. Empresa Minera decide paralizar operaciones.
Febrero 2001	<b>Verificación de condiciones ambientales del depósito</b> (D&E: <b>foco potencial de contaminación</b> ). (Informe N° 108-2001-EM-DGM-DFM/MA).
26/III/2001	MEM ordena <b>paralización definitiva de disposición de relaves</b> . Plazo de 60 días (estudio definitivo). Informe N°108-2001-EM-DGM-DFM/MA).
Año 2002	Cerco perimetral impide acceso de terceros al área. Se coloca sobre el depósito capa de 200 mm de suelo revegetado con plantas locales.
Setiembre 2002	<b>Estudios de Impacto Ambiental</b> del Depósito de Relaves Aruri y para el <b>Traslado y Disposición Final del Relave de Mayoc</b> .
23-II-2003	No retiran relaves. CONACAMI PERÚ <b>denuncia ante Comisión Interamericana de Derechos Humanos-OEA</b> , al Estado Peruano.
Mayo 2004	Comisión Técnica de relaves (autoridades locales, población, Minem, WSL y L&Z) acuerda <b>priorizar estudios</b> (remoción y traslado relaves).
Diciembre 2004	WSL encarga a SVS Ingenieros S.A. elaborar <b>estudio para seleccionar mejor opción para remover y trasladar relaves en Mayoc</b> .
10-II-2005	Comisión Técnica <b>presenta opción de traslado de relaves y plan de cierre de relavera</b> en Audiencia pública.
Abril 2005	Se presenta <b>Plan de Cierre de depósito de relaves de Mayoc</b> a Minem, elaborado por SVS Ingenieros S.A. por encargo de WSL S.A.
Junio 2005	Dirección General de Minería <b>aprueba Plan de Cierre de depósito de relaves Mayoc</b> (R.D. N° 230-2005/MEM-AAM).
Octubre 2005	Examen Especial: <b>Verificación de implementación de Plan de Cierre de depósito de relaves de Mayoc</b> por D & E. (RD N° 491-2005-MEM-DGM/V).
Abril 2006	<b>Auditoría Ambiental de Verificación Ejecución Plan de Cierre Depósito de Relaves</b> . D&E (Resolución Directoral N° 451-2006-MEM-DGM/V).
Julio 2006	D & E: <b>Informe complementario Auditoría Ambiental de verificación de plan de cierre del depósito de relaves Mayoc</b> . 5ª visita de inspección del traslado de relaves en Mayoc (Compañía Minera San Juan Perú S.A.)

## 1.2 Descripción del área de interés

El paraje de Mayoc se ubica políticamente en el distrito de San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí, una de las 10 provincias del departamento de Lima; a una altitud promedio de 3000 msnm. Huarochirí es la provincia más extensa del departamento de Lima, tiene 5 657,93 km<sup>2</sup> de superficie. El distrito de San Mateo es uno de los 32 distritos de la provincia de Huarochirí, su capital es San Mateo, también ubicada al lado de la Carretera Central, en la zona de curvas para ascender a la cordillera andina, donde el valle se estrecha dando espacio sólo para la carretera, la vía férrea y el río Rímac.

El depósito de relaves de Mayoc se encontraba en el paraje del mismo nombre, aproximadamente a la altura del km 92 de la Carretera Central, vía a través de la cual se accede desde la ciudad de Lima. El lugar se halla a 1,5 km de la Planta Tamboraque en el *antiguo fundo Glorieta de Mayoc (adyacente a la localidad de Daza)*. Su ubicación es de fácil accesibilidad, pues se encuentra al pie de la carretera pavimentada, empleándose aproximadamente unas dos horas de recorrido en automóvil, desde el centro de la ciudad de Lima. Ver **Planos Nº 1.1 y 1.2**.

Las coordenadas UTM promedio de ubicación de la zona donde estaba la relavera son:

**8 699 045 N; 357 958 E** y 2 940 msnm.

Las coordenadas geográficas de la misma zona están entre: 11°45'-11°47' de latitud y 76°18'-76°20' de longitud en la zona 18.

Los depósitos de relaves Nº 1 y 2 de Tamboraque se ubican a un costado de la Carretera Central, por el kilómetro 90, en el distrito de San Mateo, a una altitud media de 2 990 msnm, en las coordenadas UTM **8 697 656 N y 357 946 E**.

Ver **Plano Nº 1.3** (Ubicación de relaves en Mayoc y Tamboraque).

El anexo Glorieta de Mayoc y el lugar que se usó como depósito de relaves se encuentran:

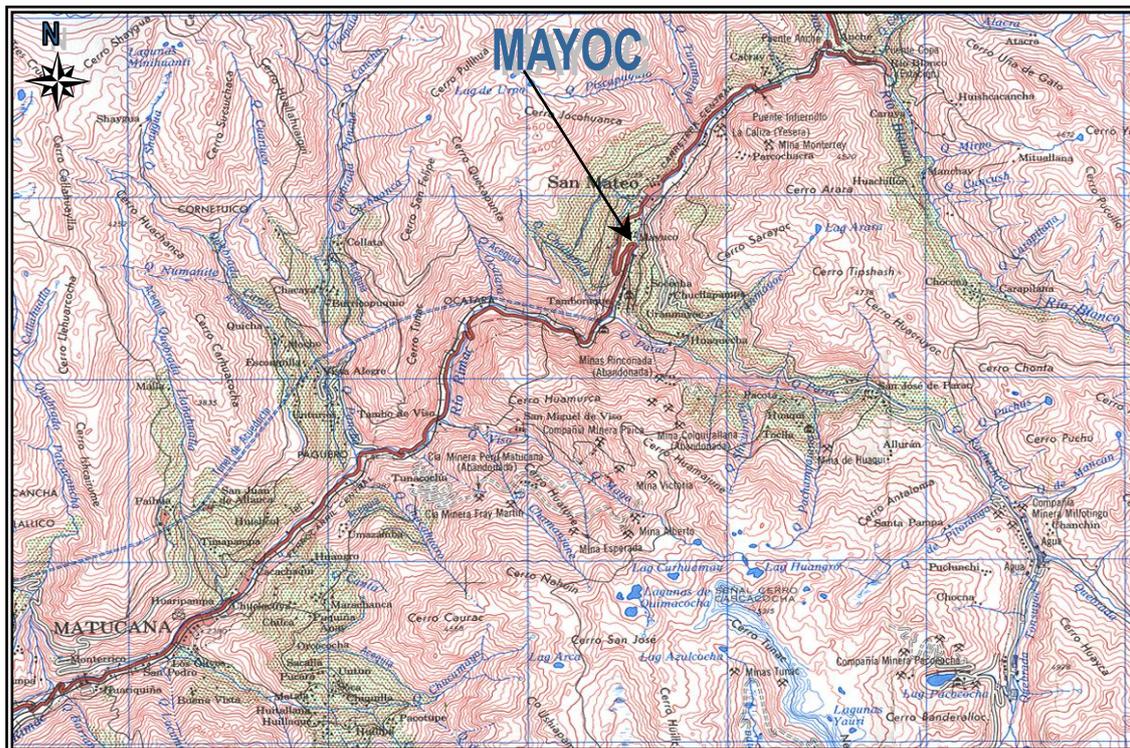
- Aproximadamente de 50 a 200 m de la Carretera Central, la que se ubica en la ladera oeste del valle y que al ensancharse, el valle, toma altura serpenteándose. Al lado de la carretera se ha desarrollado el caserío de Daza.
- A unos 200 m de la vía férrea que se ubica en la ladera este del valle.
- A unos 1,7 km al NNE de la Fundación Tamboraque.

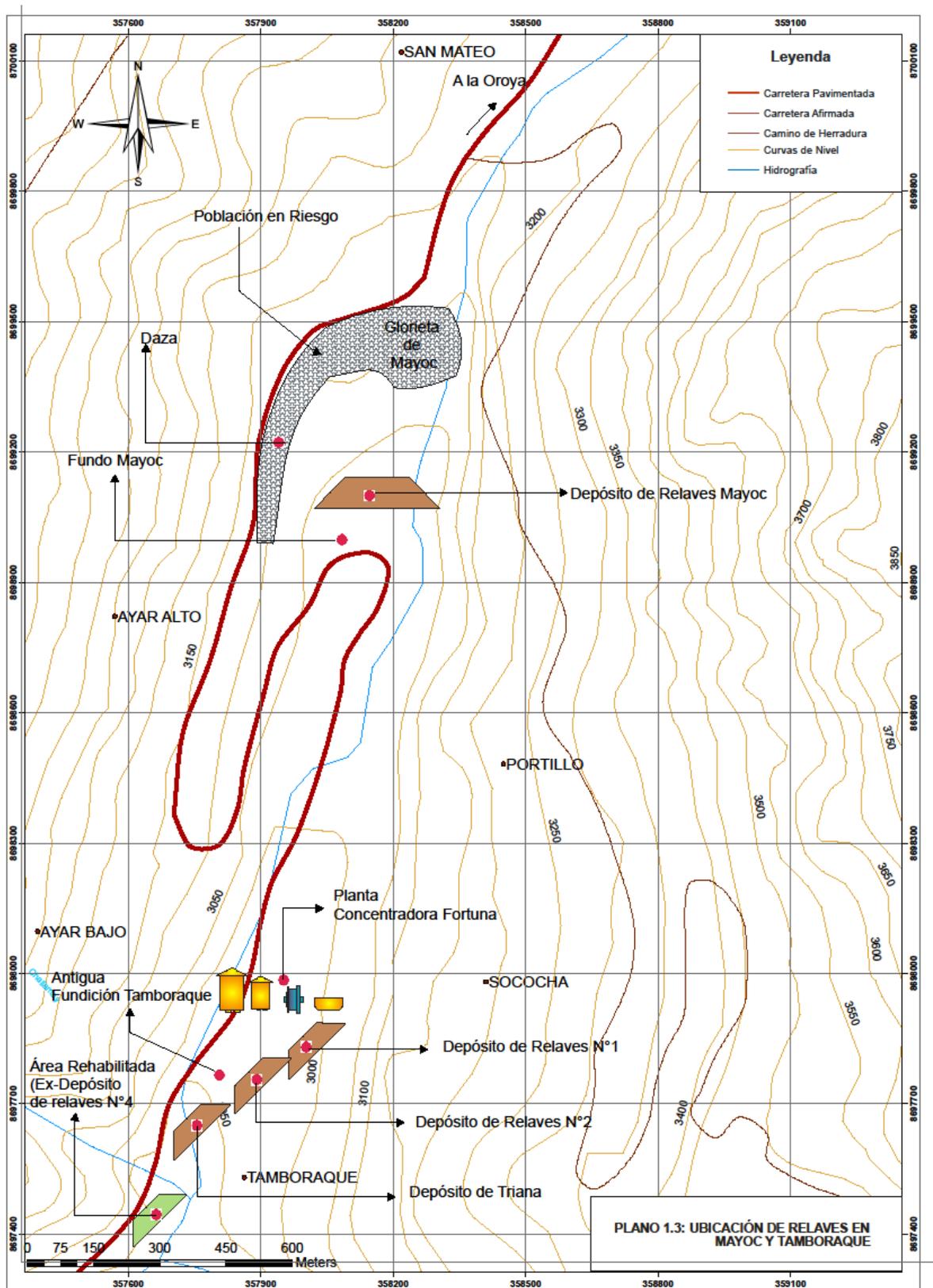
Los demás parámetros que describen completamente el área de interés como Topografía, clima, sismicidad, ambiente socio-económico, etc. se encuentran en el **Anexo Nº 1.1**.

## Plano Nº 1.1 Accesibilidad a Mayoc



## Plano Nº 1.2.- Ubicación geográfica de Mayoc





### 1.3 Descripción de los procesos industriales en el área

#### 1.3.1 UNIDAD MINERA CORICANCHA

El área donde se encuentran las instalaciones industriales de la Unidad Minera Coricancha en Tamboraque abarca alrededor de 28 hectáreas.

El proceso productivo principal de la zona se basa en la explotación del conjunto de vetas que conforman la Mina Coricancha. La veta Constanza o Coricancha es la estructura mineralizada más grande de la mina, con una potencia promedio de 0,85 a 1,0 m.

La mineralogía de esta veta 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 (Año 2001): 100 TMD aproximadamente:

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

*Verificación de condiciones ambientales-Depósito de relaves Mayoc - MINEM 2001.  
D&E Desarrollo y Ecología S.A.C.*

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.

En el año 2006 Gold Hawk Resources Inc. a través de CMSJ Perú S.A. adquiere 99 concesiones mineras en Tamboraque, que cubren un área aproximada de 3 162 has.

El sistema mineralizado es un depósito hidrotermal de baja sulfuración. La mineralización está comprendida por pirita, esfalerita, plata, galena, chalcopirita, arsenopirita, tenandita, tetraedrita, oro nativo, plata nativa y cuarzo. En informe técnico del 23 de enero del 2006 se infieren recursos minerales totales de 4,5 millones de toneladas con las leyes:

Elemento	Au	Ag	Pb	Zn	Cu
Oz/ton	0,4	14,9	5,8	7,0	0,79

*Fuente: Perú INFOMINE*

La producción promedio en el año 2008 es de **600 TMD** aproximadamente. **(24)**

#### 1.3.2 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<sub>4</sub>, Xantatos y Cal) y generando un primer 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 N° 1 y 2), separando por **flotación** un *concentrado de oro-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° 1.1. (8,9)**

### **Año 2008**

La planta concentradora de Tamboraque tiene capacidad para procesar unos 600 TMD de sulfuros, procedentes de la mina Coricancha. En la primera etapa se obtiene concentrados de Pb-Cu y Zn (flotación selectiva), en la segunda etapa se obtienen concentrados de Pirita y Arsenopirita con alto contenido valioso de oro y plata. Estos se envían a la planta de lixiviación bacteriana para su recuperación y el concentrado oxidado que se obtiene en dicho proceso pasa al circuito de cianuración, obteniéndose oro y plata mediante extracción por carbón activado (proceso CIL - Carbon In Leaching). **(29)**

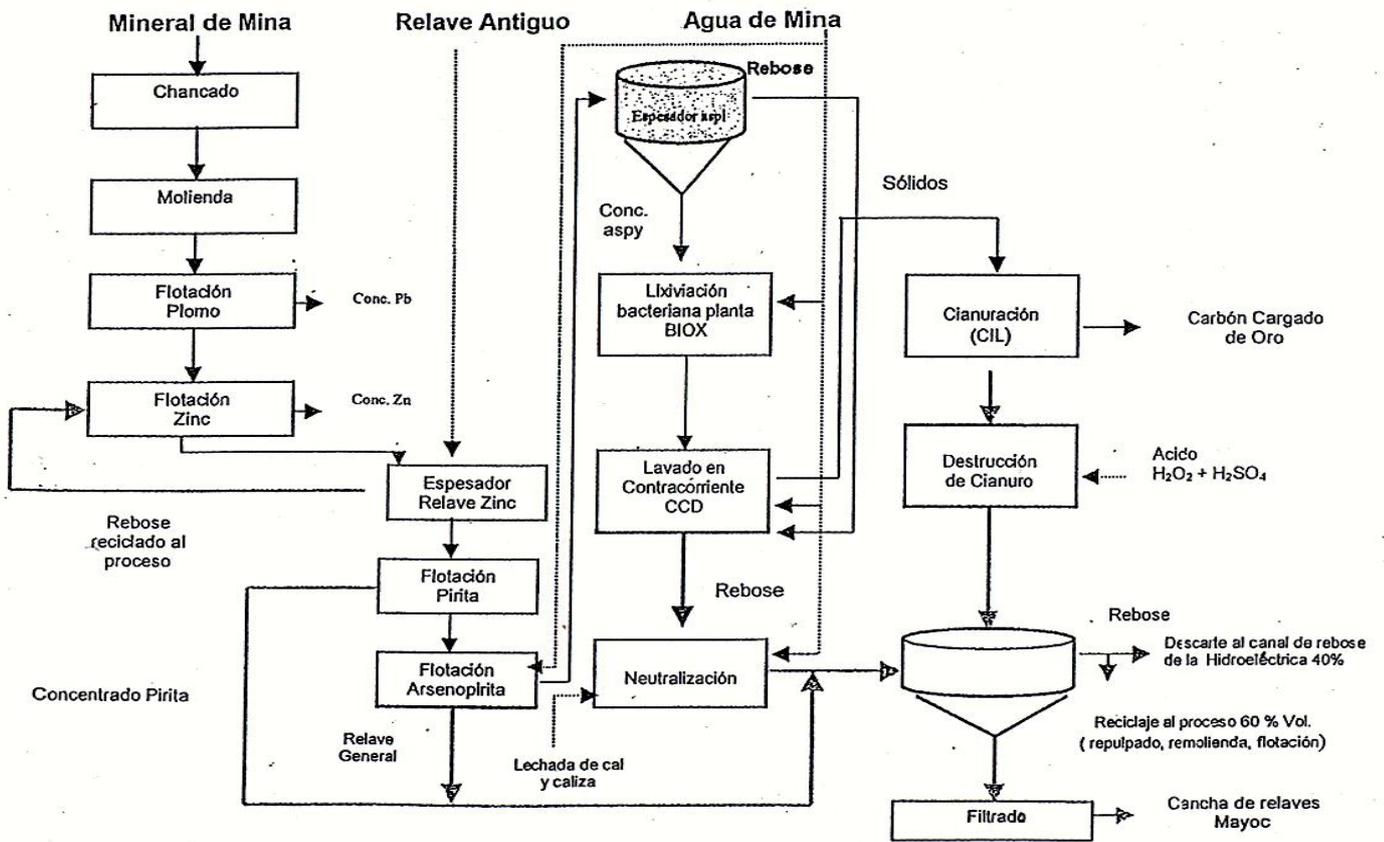
### **1.4 Manejo de residuos - Depósito de relaves Mayoc**

Febrero 2001: **Inspección especial** a cargo de D&E Desarrollo y Ecología SAC.

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. Ver **Diagrama N° 1.1**. El material final compactado y con la suficiente humedad no produce polvos. Ver **Fotografías N° 1.1 y 1.2**.

# Diagrama N° 1.1.-

## Líneas de producción de la Planta de Beneficio Tamboraque





**FOTOGRAFÍA N° 1.1.-** Vista de Mayoc de Norte a Sur, se aprecia el dique del depósito de relaves proyectado. Curva de la carretera central.



**FOTOGRAFÍA N° 1.2.-** Vista del emplazamiento total de la relavera.

### **Año 2004, antes de la remoción**

La Comisión Técnica de los Relaves de Mayoc acepta finalmente, el traslado de los relaves del depósito de Mayoc. Estos, previamente inertizados, serán íntegramente transportados hacia los depósitos de relaves Tamboraque N° 1 y 2 y el plan de cierre de la relavera involucra **rehabilitar el área alterada**, donde actualmente se encuentran depositados los relaves. El traslado de estos relaves forma parte del Plan de Cierre del depósito de Mayoc. **(8)**

### **Año 2005: Traslado del relave del Depósito de Mayoc**

La descarga de los relaves de Mayoc en Tamboraque, se realiza en una amplia plataforma de aproximadamente 17 m de ancho, ubicada entre la plataforma superior de los depósitos de relaves N° 1 y 2, y el pie del talud correspondiente. Ver **Fotos N° 1.3 y 1.4**. Los **relaves almacenados en el depósito de Mayoc**, estimados en 37 000 m<sup>3</sup> en el Plan de Cierre y cuantificados de manera efectiva en 54 203 m<sup>3</sup>, superando en un 46,5% la estimación preliminar, **fueron retirados en su totalidad** en el período comprendido entre el 01 de setiembre 2005 y el 07 de enero 2006. Ver **Fotografías N° 1.5 y 1.6**. **(8)**



**FOTOGRAFÍA N° 1.3.-** Descarga directa de relave en la plataforma superior de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, 2005.



**FOTOGRAFÍA N° 1.4.-** Recrecimiento de la plataforma inferior de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, con una geometría de talud de 2H:1V-Sector Oeste 2005.

#### **Año 2006, después de la remoción de los relaves**

La **superficie del depósito Mayoc** ha sido nivelada habiéndose otorgado una gradiente de 11,83%; es decir, tiene una geometría de 8,45 H:1 V (6,7° de inclinación), en concordancia con el relieve topográfico de los terrenos colindantes y adecuando el terreno para un drenaje natural de las aguas superficiales.

Culminados los trabajos de remoción y traslado de relaves, nivelación, perfilamiento y limpieza del terreno, no se efectúa cobertura con suelo orgánico, por considerarlo innecesario el titular, al haberse hecho contacto con terreno natural fértil.

Sin embargo, los **resultados de análisis de suelos no confirman esta hipótesis.**

**Los pobladores exigían limpieza de terreno (1 m de profundidad) después del retiro de relave porque no saben hasta dónde haya penetrado el material tóxico. Después reforestar y recuperar el bosque que hubo.**

El depósito Mayoc se reforesta con 2 400 *plantones de eucalipto*. Estos se observan en buen estado, habiendo alcanzado la mayoría una altura de casi 1,0 m (D&E Desarrollo y Ecología SAC, Examen especial para verificar la implementación del Plan de Cierre del depósito de Relaves Mayoc, Minem, Perú, Julio 2006).

Con el traslado de los relaves del depósito de Mayoc se da inicio al cierre de los depósitos N° 1 y 2 de Tamboraque, se define a Chinchán como el nuevo lugar para depositar los relaves de los procesos minero-metalúrgicos en Coricancha y Tamboraque.



**FOTOGRAFÍA N° 1.5.-** Vista panorámica del depósito de relaves Mayoc, se aprecia el avance físico de la remoción, 2005.



**FOTOGRAFÍA N° 1.6.-** Vista interior del depósito Mayoc, zona donde los relaves han sido removidos y trasladados, y en la cual se tomaron tres muestras de suelos, 2005.  
**Años 2007-2008**

Los relaves producidos entre abril 2007 a mayo 2008 por la Planta de Beneficio Tamboraque han sido dispuestos en los depósitos N° 1 y 2, próximos a trasladarse a Chinchán.

OSINERGMIN requirió a la Compañía Minera San Juan (Perú) S.A. el **retiro inmediato del total de los relaves del Depósito de Relaves 1 y 2** de la concesión de beneficio “Concentradora Tamboraque”.

- Mediante Decreto Supremo N° 051-2008-PCM publicado el 18 de julio de 2008, se declaró el **estado de emergencia del cerro Tamboraque del distrito de San Mateo de Huanchor, por un plazo de sesenta (60) días calendario**. El problema actual del depósito de relaves en Tamboraque es un problema de estabilidad de la ladera del cerro donde está ubicado, por lo que es necesario trasladar el material a un área más estable. (Resolución Directoral N° 224-2008-MEM-/AAM-DGM). **(29)**

En Diciembre del 2008 CMSJ presenta el EIA del depósito de relaves Chinchán. Teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio libre después del almacenamiento de los relaves filtrados procedentes del Depósito 1 y 2, la vida del Depósito de Chinchán para almacenar los relaves frescos de la planta de beneficio es de 1,1 años. El Proyecto Chinchán se encuentra ubicado en la margen derecha de la quebrada Chinchán en el distrito de Chicla, provincia de Huarochirí, departamento de Lima. (Ver **Plano N° 1.4**).

**Hasta el año 2009 la población aledaña a la quebrada de Chinchán en Chicla, se resiste a aceptar el depósito de relaves Chinchán**, mediante observaciones al EIA.

### **1.5 Importancia del Plan de Cierre**

El **Plan de Cierre** se establece **medidas destinadas a prevenir, atenuar y remediar los impactos ambientales, antes del término de sus operaciones y con posterioridad a este**. Por lo menos **cada cinco años, el Plan de Cierre debe revisarse para su actualización**, pudiendo modificarse en caso que se produzcan cambios significativos. El Minem hará entrega de un Certificado de Cierre al cumplirse con el cierre definitivo de las instalaciones. **(29)**

En el **año 2011** la Compañía Minera San Juan presentará los resultados del monitoreo efectuado en el ex - depósito de relaves de Mayoc, el estado del terreno y de la vegetación.



## CAPÍTULO II

### 2. CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL ARSÉNICO

#### 2.1 Ciclo biogeoquímico global del arsénico

Antes de considerar un ciclo estimativo global, es conveniente la revisión de las magnitudes de los diferentes flujos de transferencia de arsénico a lo largo y ancho de la superficie terrestre. Las emisiones naturales son menores que las emisiones de carácter antropogénico. El arsénico es lanzado a la atmósfera en cantidades significativas desde plantas generadoras de energía por quemado de carbón; siendo estas emisiones en estado gaseoso debidas a los bajos puntos de ebullición que presenta el arsénico y sus derivados. Por tanto, también se producirá este tipo de fenómeno en procesos de carácter vulcanístico y en el quemado de vegetación.

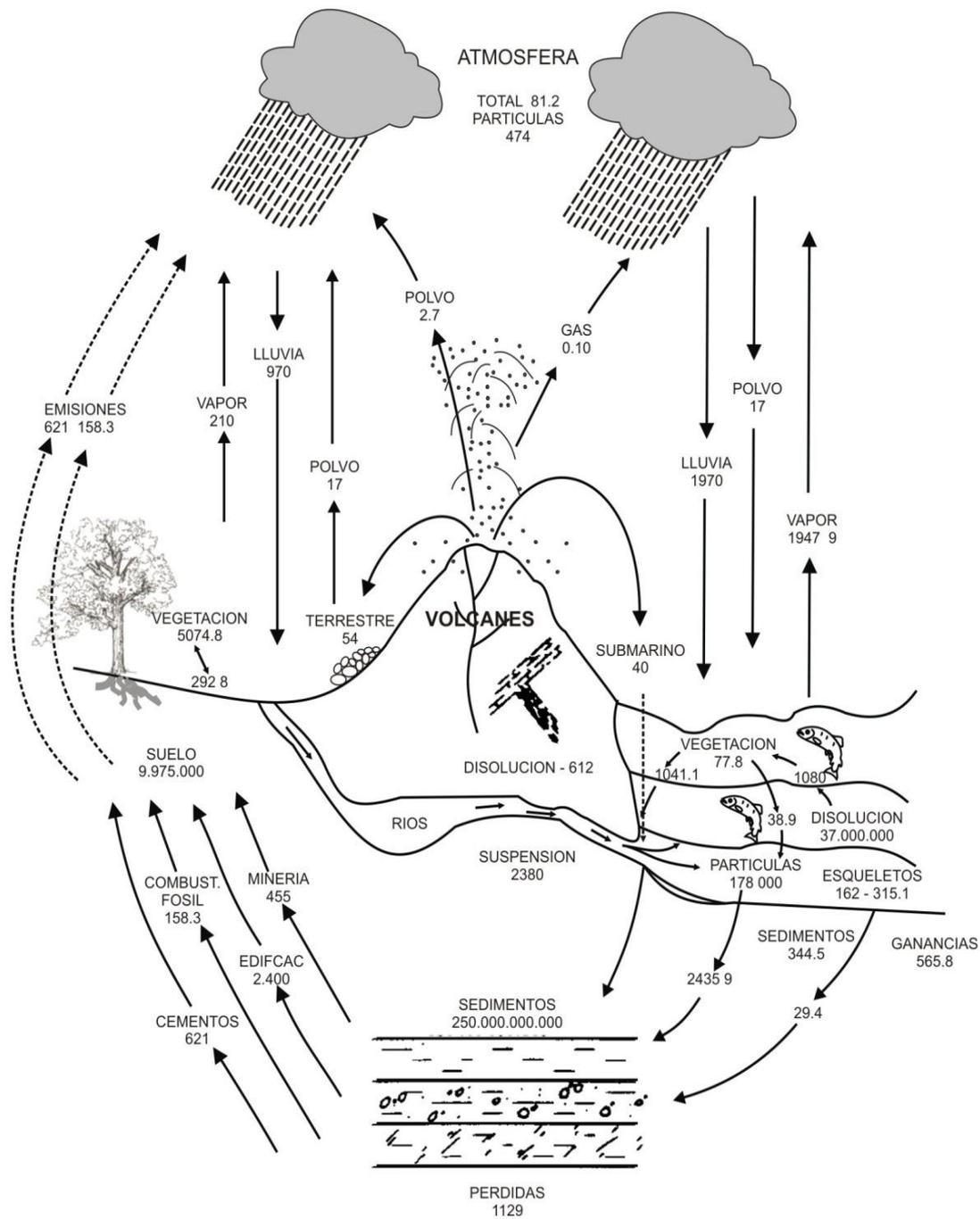
A temperatura ambiente el arsénico se libera a la atmósfera como compuestos volátiles, producto de la metilación biológica. Las entradas estimadas en la atmósfera procedentes de actividades industriales **78 000 t/año**, son elevadas si las comparamos con los procedentes de la minería, **46 000 t/año** o con el arsénico contenido en el polvo volcánico o continental, **2 800 t/año**.

El ciclo biogeoquímico global del As (**Figura Nº 2.1**) describe el papel del arsénico en cada ecosistema fundamental, así como los flujos que entre ellos se establecen, basándose en la recopilación de multitud de datos procedentes de muy diversas fuentes. Las reservas de cada compartimiento y los flujos entre los compartimentos se expresan como  $10^8$  g (o 100 t) y  $10^8$  g/año (o 1 000 t/año), respectivamente.

En medios reductores como sedimentos, el arseniato es reducido a arsenito y éste mediante metilación y oxidación es transformado en compuestos tales como los ácidos metil y dimetilarsónico (**Figura Nº 2.2**).

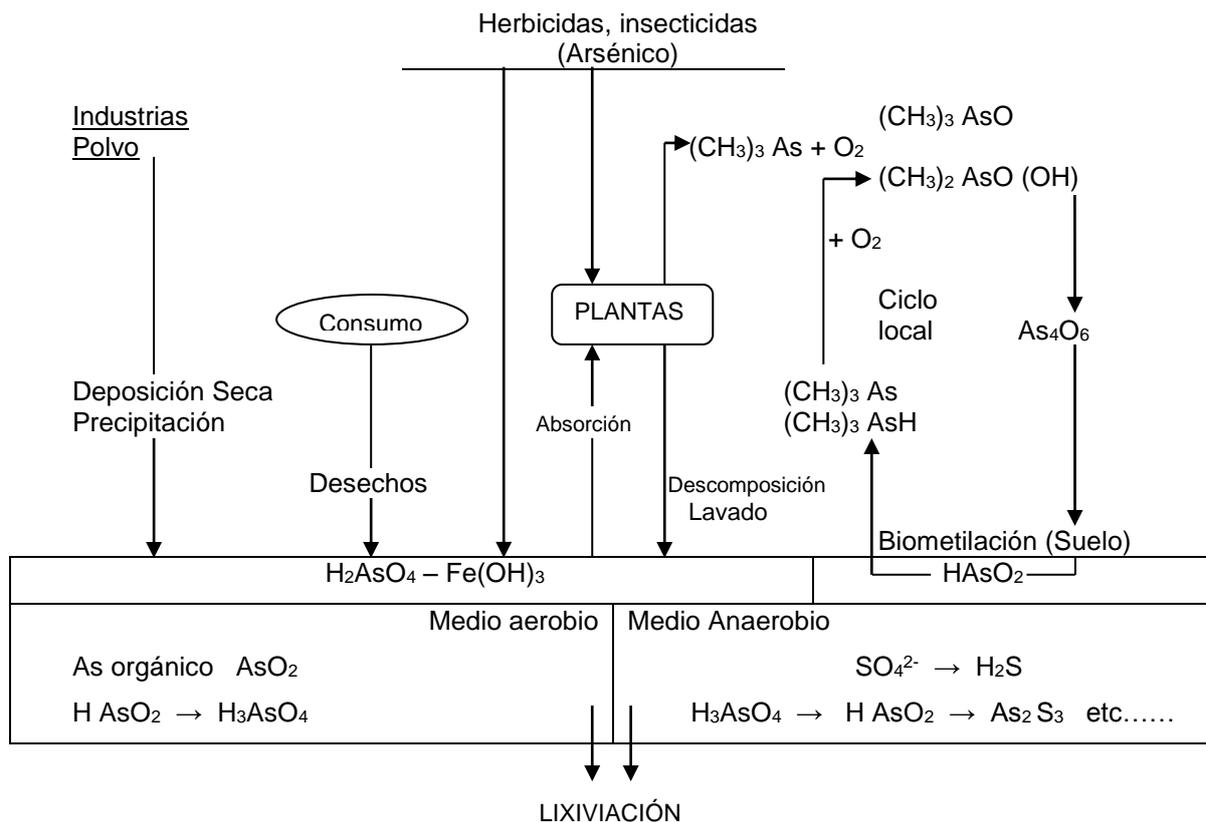
Diversos microorganismos como hongos, bacterias y levaduras, transforman estos ácidos anteriores en derivados metilados de la arsina, trimetilarsina o dimetilarsina, que pueden emitirse a la atmósfera. Anualmente se pierden en la atmósfera **21 000 t** de As desde la superficie terrestre debido a estos procesos. El arsénico comercial se obtiene por recuperación y purificación de gases ricos en el elemento, procedentes de los procesos de extracción y fundición de minerales de cobre, zinc y plomo.

La cantidad finalmente recuperada representa únicamente un pequeño porcentaje del contenido total de arsénico en estos minerales. De forma que una gran fracción del elemento no recuperado se deja escapar a la atmósfera, suponiendo **45 500 t/año**. Mientras que la emisión debida al tratamiento y procesamiento de minerales sulfurados representa **60 000 t/año**. (6)



**Figura N° 2.1.- Ciclo global biogeoquímico del arsénico**

Fuente: A. Carbonell et al. As en sistema suelo-planta - U. Alicante, 1995.



**Figura Nº 2.2.- Ciclo local aire-suelo para el arsénico**

Fuente: A. Carbonell et al. As en sistema suelo-plantas - U. Alicante, 1995.

### Actualización de este ciclo de carácter estático

La actividad humana ha modificado el ciclo global del As, produciendo pérdidas de los sedimentos, **112 900 t/año**, y enriqueciendo los suelos, **66 000 t/año** y los océanos, **56 600 t/año**. La atmósfera se considera como un compartimiento en régimen estacionario, sin pérdidas ni ganancias (As). Este hecho se justifica si las formas volátiles de As emitidas a la atmósfera son rápida y totalmente disueltas en el agua de lluvia y eliminadas cuando esta se precipita. El tiempo de residencia de estos compuestos en la atmósfera es de 10 días, aproximadamente el mismo que permanece el agua en este compartimiento. En la actualidad, existe un elevado flujo de As desde los ríos hacia océanos por la fuerte erosión y degradación que está sufriendo la superficie continental. Gran cantidad del contaminante se transporta como material en suspensión, y una vez se alcanza el océano se incorporan a los sedimentos oceánicos, aunque una parte del arsénico puede incorporarse al agua. En la **Tabla Nº 2.1** se dan los Tiempos de residencia para As en ecosistemas individuales. El tiempo de residencia del elemento en la vegetación terrestre y oceánica es similar al del carbono orgánico en estos mismos compartimientos.

No se dan acumulaciones significativas en la vegetación, aunque *algún organismo vegetal en particular pueda acumular puntualmente el contaminante*. Aunque la actividad humana ha desplazado del equilibrio, el ciclo global estacionario descrito con anterioridad para el arsénico, y debido a que los tiempos de residencia del contaminante en los suelos, océanos y sedimentos son enormes, la posibilidad de una acumulación de As en alguno de estos ecosistemas hasta niveles tóxicos está totalmente injustificada, aunque puede ocasionar problemas a tener en cuenta. (6)

**Tabla Nº 2.1.- Tiempos de residencia (años) de As en diversos ecosistemas**

Compartimiento	As	Se	Hg
<i>Sedimentos</i>	<b>99.800.000</b>	93.500.000	90.800.000
<i>Océano (disolución)</i>	<b>9.400</b>	2.200	880
<i>Suelo</i>	<b>2.400</b>	4.600	280
<i>Vegetación Terrestre</i>	<b>17</b>	17	22
<i>Vegetación Oceánica</i>	<b>0,07</b>	0,07	0,12
<i>Atmósfera (Total)</i>	<b>0,03</b>	0,03	0,1

Fuente: A. Carbonell et al. As en sistema suelo-planta, U. Alicante, 1995.

## 2.2 Geoquímica, hidrogeoquímica y química del suelo

### 2.2.1 Geoquímica

El Arsénico 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. Es **indicador de mineralización de oro**. Se encuentra frecuentemente acompañado por antimonio. En la Tabla Nº 2.2 se indican algunos minerales de arsénico. (33)

**Tabla Nº 2.2.- Algunos minerales comunes del arsénico**

Nombre de Mineral	Tipo de Compuesto	Fórmula
<b><i>Arsenopirita (Mispíquel)</i></b> <b><i>Oropimente</i></b> <b><i>Rejalgar</i></b>	Sulfuros	FeAsS As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> As <sub>4</sub> S <sub>4</sub>
<b><i>Tennantita</i></b> <b><i>Energita</i></b>	Sulfosales	(Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>
<b><i>Escoriodita</i></b> <b><i>Mimetita</i></b>	Arseniatos	FeAsO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O Pb <sub>5</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl
<b><i>Trippkeita</i></b>	Arsenitos	CuAs <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b><i>Lollingita</i></b>	Arseniuros	FeAs <sub>2</sub>
<b><i>Arsenolita</i></b>	Óxidos	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

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

El contenido de arsénico de la corteza terrestre está entre 1.5 y 2 mg/kg, siendo el elemento número veinte en la lista de los elementos más abundantes (N.A.S., 1977).

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 ha encontrado concentraciones más elevadas en sedimentos arcillosos finos y fosforitas. 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. **(14, 32)**

### **2.2.2 Hidrogeoquímica**

La concentración de arsénico en aguas frescas, típicamente oscila de 1-10 µg/L, elevándose a 100-5000 µg/L en áreas de mineralización de sulfuros. 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. El arsénico está concentrado en algunos sedimentos marinos reductores, los cuales pueden contener hasta 3 000 mg/kg. ***Solamente una fracción muy menor del arsénico total en los océanos se mantiene en solución en el agua de mar, pues la mayoría es absorbida en el material particulado.*** **(14, 32)**

### **2.2.3 Química del Suelo**

El suelo no es una entidad estrictamente geológica, por lo que la ciencia que lo estudia, la **edafología**, esta vinculada a otras ciencias, geología, biología, **química**, agronomía y hasta economía (considerado un recurso natural). El interés por la presencia de arsénico en suelos orienta el estudio hacia la química del suelo. Ver **Anexo Nº 2.1**.

#### **2.2.3.1 Características del suelo que definen la química del arsénico**

La química del arsénico en suelos depende de factores como características del suelo (rangos de E y pH, componentes predominantes de los suelos), la actividad microbial causante de metilación, dimetilación y/o cambios de estado de oxidación, entre otros.

La sorción, solubilidad y velocidad de oxidación de las especies de As pueden estar influenciadas por minerales arcillosos, óxidos de Fe, Mn y Al, y materia orgánica.

Se ha desarrollado técnicas experimentales encaminadas a la separación de las especies medioambientales inorgánicas de las orgánicas (Especiación). (Ver **Anexo Nº 2.2**)

La *presencia de óxidos de hierro y aluminio en los suelos* se suele correlacionar positivamente con los minerales de arcilla presentes y por tanto, con la **textura del suelo**.

La **mayor disponibilidad del arsénico en suelos arenosos**, cinco veces más disponible según la bibliografía que en suelos arcillosos, se manifiesta en la alta correlación positiva que presenta este elemento con la fracción arena muy fina. Sin embargo con las fracciones gruesas, grava, arena gruesa y arena muy gruesa, las correlaciones son negativas, así como con el porcentaje en carbonato cálcico.

Gran parte del arsénico de los suelos está adsorbido sobre compuestos amorfos de hierro y aluminio. Los arseniatos de hierro y aluminio son las fases dominantes en los suelos ácidos y son menos solubles que el arseniato de calcio, que es la forma química principal en muchos suelos calcáreos. El arsénico se precipita como arseniato férrico en horizontes de suelo ricos en hierro. Se ha encontrado que los suelos con un nivel elevado de hierro reactivo tienen gran número de enlaces hierro-arsénico. Si el hierro reactivo disminuye, entonces el enlace arsénico-aluminio o arsénico-calcio pasan a ser la forma predominante de arsénico. La importancia del hierro, del aluminio y de otros cationes en la adsorción del arsénico se puede determinar mediante el uso de extractantes parciales del suelo. Diversos investigadores utilizaron un procedimiento de extracción química, similar al usado para caracterizar los componentes de fósforo en el suelo, para dilucidar la manera en que el arsénico estaba adsorbido o asociado a los suelos.

En investigaciones sobre la distribución de ácido cacodílico (CA) en fracciones del suelo se encuentra, en contraste con la situación presentada por el arsénico inorgánico, que este compuesto arsenical se distribuye siguiendo la pauta:

***soluble en agua > aluminio > hierro > calcio***

El **pH del suelo** influye en la actividad del aluminio en arcillas y en óxidos e hidróxidos, pero es la cantidad de dichos coloides, más que el efecto del pH sobre ellos, el factor que gobierna su capacidad adsorptiva. La adsorción de arsénico es dependiente del tiempo. El tiempo de equilibrio se alcanza a tiempos inferiores si se trabaja con suelos de texturas gruesas o con niveles bajos de arsénico en disolución. *Menor cantidad de arsénico está presente en la fracción disponible en suelos de textura fina y esto implica que los residuos del contaminante son potencialmente menos fitotóxicos en este tipo de suelos.*

En los estudios de adsorción de arsenicales y fosfato se concluye que la adsorción aumenta en el siguiente orden:

***fosfato < ácido cacodílico < arseniato = metilarsoniato.***

Por lo que se puede afirmar que el **fosfato** es un **compuesto relativamente** inmóvil.

Los herbicidas de arsénico plantearán una leve amenaza para la contaminación de las aguas subterráneas debido a las mínimas cantidades de contaminante que se pueden perder por lavado o lixiviación, siendo más factibles pérdidas de ácido cacodílico que de arsénico inorgánico. **(5, 19)**

Se ha encontrado una diferencia considerable en las velocidades de movimiento del arsénico y del DSMA a través de un suelo margo-arcilloso y de un suelo margo-arenoso. El 52 % del producto aplicado se recogía al final de la columna de margo-arenoso, mientras que no se detectaba producto en el eluido procedente de la columna del suelo margo-arcilloso (en ambos casos el eluyente era el agua). Sobre la mitad del DSMA añadido permanecía en los dos primeros centímetros de la columna de arcilla-limo. En un trabajo complementario sobre los efectos fitotóxicos del DSMA se encontró que existía una marcada reducción en el contenido del compuesto con el tiempo.

El lavado del arsénico es particularmente significativo en suelos de baja capacidad adsorptiva. En suelos arcillosos, el arsénico se mantendrá en complejos de hierro y aluminio, produciéndose la lixiviación de forma lenta y gradual. Se ha demostrado que tanto las concentraciones de arseniato como las de ácido metilarsónico monosódico (MSMA) disminuyen constantemente a velocidades directamente relacionadas a su concentración. En diversos estudios sobre la **movilidad** del metanoarsoniato, después de 4 y 6 años de aplicación, prácticamente la totalidad del arsénico aplicado fue recuperado en la capa de suelo cultivable.

En gran cantidad de suelos agrícolas (pH de 5 a 7) predomina el ión univalente de los metanoarsoniatos, pero tanto el ión cacodílico como el ácido pueden estar presentes.

Se sugiere desde 1975, que todos los herbicidas arsenicales, incluso aquellos que poseen sustituyentes orgánicos actúan de forma muy similar a sus análogos inorgánicos. Los sustituyentes metilados del ión metanoarsoniato no interfieren en su adsorción, por tanto, su proceso de retención será similar al presentado por el ión arseniato en el sistema suelo. Sin embargo, es recientemente, cuando se ha demostrado la importancia de estas especies orgánicas. Aunque, la mayoría de los trabajos llevados a cabo sobre persistencia y adsorción de arsénico en suelos han sido hechos utilizando como adsorbato, arseniato inorgánico.

La forma oxidada, arseniato, aunque es la más abundante en la naturaleza (se encuentra normalmente en depósitos sedimentarios), está **fuertemente enlazada a los minerales del suelo**, particularmente a los óxidos e hidróxidos metálicos coloidales, mediante enlaces iónicos. Bajo condiciones oxidantes, en ambientes aeróbicos, los arseniatos son las especies estables. Minerales sulfurados de arsénico podrían formarse si las especies sulfuradas se encuentran presentes y si el potencial redox es suficientemente bajo.

Bajo condiciones reductoras, los arsenitos son los compuestos de arsénico predominante. Sin embargo, la reducción del arseniato a arsenito es lenta, y los sistemas de suelos pueden no estar en equilibrio. Aunque el As (III) es estable en condiciones reductoras, no es frecuente encontrarlo en su estado fundamental. (6, 14, 32)

### 2.2.3.2 Fenómenos de adsorción en el suelo

La persistencia del arsénico en el suelo está controlada por la capacidad de adsorción del mismo y por las pérdidas que se puedan producir tanto por lavado o lixiviación como por volatilización. Probablemente, un porcentaje elevado del arsénico añadido se perderá en forma de gas. Las características físicas y químicas del suelo son importantes para el control de su capacidad adsorptiva y así pues afectarán la disponibilidad de arsénico a las plantas. Se ha visto ya que la capacidad de adsorción de un suelo está afectada por su textura, contenido en sesquióxidos y por la presencia de otros elementos que puedan interferir en el proceso de adsorción.

La *arcilla es el principal adsorbente* mientras que las fracciones arena y limo muestran una capacidad de adsorción bastante reducida, debido a la baja área superficial y a la predominancia de cuarzo. Esta afirmación se basa en que el arseniato, al igual que el fosfato, es adsorbido por minerales que poseen grupos hidroxilos libres, es decir, superficiales y disponibles, como es la caolinita y los óxidos de hierro y aluminio: siendo la montmorillonita y la vermiculita los compuestos que presentan un mayor poder de adsorción. La adsorción es un fenómeno superficial que tiene lugar en la interfase y mediante el cual las moléculas de adsorbato se fijan sobre la superficie del adsorbente, en virtud de diversas fuerzas atractivas que entran en juego y que fundamentalmente se deben a la asimetría de fuerzas que existen en toda la interfase.

Según la naturaleza de estas fuerzas la adsorción puede ser de dos tipos de mecanismos:

- Fisiadsorción, mecanismo físico o no específico: fuerzas moleculares, corto alcance.
- Quimiadsorción o mecanismo de adsorción específico o químico: fuerzas de enlace.

(Ver **Anexo 2.2) (5, 6, 19)**)

### 2.3 Biogeoquímica y geobotánica

La biogeoquímica (***geoquímica orgánica***) es una ciencia interdisciplinaria que incluye las reacciones químicas en la atmósfera, en los océanos, en los suelos minerales y en organismos vivos. Al estudiar los cambios que el hombre hace en el medio ambiente en general, se comprende que los organismos vivos (incluyendo el hombre) pueden afectar las condiciones del planeta tierra como un todo. Los organismos vivos concentran determinados compuestos químicos como los carbonatos que constituyen las conchas de moluscos y partes esqueléticas de organismos superiores; o los azúcares y proteínas que acumulan las plantas, cuya concentración lleva como consecuencia la formación de un tipo de depósito denominado *biogénico* (geobotánica). **(14, 32)**

### 2.3.1 Microorganismos en los suelos

La materia orgánica que contiene el suelo procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos que contiene: lombrices, insectos de todo tipo, microorganismos, etc.

La descomposición de los seres que viven en los suelos da origen a lo que se denomina humus. Otro dato relevante con respecto a la materia orgánica es su afinidad por los metales pesados. Cuando éstos se encuentran en disolución, a menudo forman complejos orgánicos solubles, que pueden polimerizarse sobre los complejos moleculares del humus. También pueden formar directamente complejos insolubles con los compuestos del humus. De esta forma, la materia orgánica del suelo a menudo actúa como almacén de estos elementos, si bien puede transferirlos a la vegetación o a la fase acuosa si se produce su descomposición en medio ácido u oxidante. **(25, 32)**

#### 2.3.1.1 Microorganismos tolerantes y resistentes a elementos químicos

El suelo provee un hábitat para una gran variedad de organismos desde microbios hasta especies superiores como plantas. Las propiedades biológicas del suelo incluyen la actividad y diversidad de microorganismos del suelo. Los microorganismos como hongos y bacterias consumen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales se alimentan y obtienen energía. Los factores fisicoquímicos del suelo como pH, superficie o radio de acción, temperatura, salinidad, materia orgánica, disponibilidad de oxígeno, afectan el hábitat microbiano.

Dentro de la amplia diversidad microbiana, existen **microorganismos resistentes y microorganismos tolerantes a metales y otros elementos químicos**. La *resistencia o tolerancia experimentada por microorganismos es posible* gracias a la acción de *diferentes mecanismos*, como: biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación, quimiosorción mediada por microorganismos.

Algunos metales pesados son esenciales para el ser humano porque suministran cofactores básicos para diversas funciones de proteínas y enzimas, pero **en altas concentraciones los metales pesados pueden actuar en forma nociva, bloqueando los grupos funcionales esenciales**, desplazando los iones, modificando la conformación activa de las moléculas biológicas.

Los metales pesados son tóxicos para organismos superiores y microorganismos. Los microorganismos del suelo desempeñan un papel importante en la movilización e inmovilización de cationes metálicos.

El efecto de los metales pesados en las comunidades microbianas ha despertado la atención en la recuperación de suelos contaminados.

### 2.3.1.2 Transformaciones microbiológicas en los compuestos de arsénico

En el estudio de los diferentes compuestos de arsénico, inorgánicos y orgánicos, se ha puesto de manifiesto la importancia de las transformaciones microbianas.

La adición de materia orgánica (enmiendas orgánicas) mejora las propiedades físicas de los suelos y la fertilidad de los suelos agrícolas. Las enmiendas orgánicas son fuente de nutrientes esenciales para las plantas y favorecen la actividad y desarrollo de los microorganismos del suelo, mejorando su fertilidad química y biológica.

Como herbicidas se utilizan diversos derivados de los ácidos metanoarsónicos o del ácido cacodílico (CA). Estas formas orgánicas pueden oxidarse lentamente a arseniatos inorgánicos y dióxido de carbono en *presencia o ausencia de microorganismos*, o también pueden volatilizarse y por tanto, perderse de los suelos.

### 2.3.2 Microorganismos en el sistema suelo-planta

- **Rizósfera.-** *región del suelo* bajo la influencia inmediata de las **raíces de plantas**, donde haya una abundante **población microbiana**.
- **Hongos micorrízicos.-** microorganismos que permanecen asociados a las raíces de las plantas desde el origen del mundo. El término **micorriza** fue acuñado por el científico alemán Albert Frank en 1885. el griego: “**mykes**” (hongo) y “**rhiza**” (raíces).

Las plantas que crecen en suelos ricos en metales son investigadas, en la mayoría de los casos no se trata de especies raras, si no de cultivos comunes que se han ensayado con éxito como posibles especies **fitorremediadoras** en el futuro, como alfalfa, mostaza, tomate, calabaza, sauce y bambú. Las principales familias a las que pertenecen las plantas hiperacumuladoras son: *Asteraceae, Aceraceae, Poaceae, Brassicaceae, Betulaceae, Convolvulaceae, Cyperaceae, Fabaceae, Malvaceae y Oleaceae*.

- **Hongos micorrízicos arbusculares (HMA).-** La micorriza arbuscular es la más extendida sobre el planeta, tanto por el número de hospederos, como por su distribución geográfica. Se presenta en el 96% de plantas vasculares como biofertilizante. Los HMA son los microorganismos del suelo más comunes y constituyen un importante componente funcional del sistema suelo-planta, suceso presente en casi todos los hábitats y climas, incluyendo suelos perturbados por la contaminación. Sin embargo los suelos degradados pueden sufrir cambios en la diversidad y abundancia en las poblaciones de los HMA. Ver **Anexo N° 2.3. (6, 25)**

### 2.3.3 Arsénico en plantas (*Geobotánica*)

Las características físicas y químicas del suelo son importantes para el control de su capacidad adsorptiva y así pues afectan la disponibilidad de arsénico a las plantas. Una amplia variedad de compuestos de arsénico se pueden absorber por las plantas, pero tienen diferentes efectos tóxicos. Las transformaciones que se producen en el suelo y la disponibilidad de estos compuestos son dos factores importantes a considerar cuando se estudia la contaminación del sistema suelo-planta. **(6, 32)**

#### 2.3.3.1 Niveles de Arsénico en las plantas

El arsénico es un constituyente de la mayoría de las plantas. Niveles de arsénico natural en plantas rara vez exceden **11  $\mu\text{g/g}$  (0,011 ppm o mg/kg)**. La planta de referencia hipotética fue asignada con una concentración de arsénico de 0,1  $\mu\text{g/g}$  (Markert 1992).

Aunque aún no se ha demostrado que el arsénico sea un nutriente esencial para la planta, sí se ha probado su función esencial para el metabolismo animal.

Sin embargo, varios autores han encontrado *estimulaciones del crecimiento de plantas* por adiciones de arsénico, hallándose beneficios para el crecimiento de algunos como guisantes, trigo y papas, pero no para otros como frijoles.

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. Es raro que la acumulación de arsénico en las plantas alcance niveles perjudiciales para los seres vivos, porque invariablemente el crecimiento es reducido antes de que el contenido alcance niveles tóxicos. El As de los suelos no está prácticamente disponible para la toma o absorción por parte de las plantas. Siendo la adsorción del ión arseniato por los óxidos de hierro y aluminio del suelo, la principal causa que restringe la disponibilidad del contaminante para la planta. La **forma arseniato**, entonces, **escasamente disponible para la planta**, no alcanza concentraciones superiores a 1 mg/K de arsénico. **(6, 32)**

#### 2.3.3.2 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 metaloide es un constituyente de la mayoría de las plantas y puede ser fitotóxico.

Se supone que el proceso de absorción e incorporación del As es pasivo, que se traslada a la mayoría de las partes de la planta, siendo encontrado mayormente en raíces y hojas antiguas.

La acumulación de As en plantas puede estar afectada por muchos factores, como *especies de plantas*, el tipo de compuestos utilizados, métodos de aplicación, condiciones del suelo y aplicación de fertilizantes. Los compuestos de As han sido usados en agricultura como pesticidas, durante años. Los arsenicales orgánicos han reemplazado, en la mayoría de los casos, a los inorgánicos como herbicidas selectivos o generales. Son aplicados en proporciones más bajas que los arsenicales inorgánicos para reducir en general los problemas asociados con la acumulación de As en suelos agrícolas, pero puntualmente pueden persistir y merecen ser estudiados.

La **fitotoxicidad** es también dependiente de la sensibilidad del cultivo, así pues, el ***arsénico total del suelo no refleja adecuadamente la forma en que es disponible el elemento para la planta o su grado de toxicidad.*** (6)

La fitotoxicidad del arsénico viene determinada por la forma química presente en el suelo. El arsenito es más fitotóxico que el arseniato y ambos son mucho más fitotóxicos que el metanoarsoniato monosódico (MSMA) y el ácido cacodílico (CA). La **textura del suelo** es un factor importante en la determinación de la fitotoxicidad del arsénico añadido al suelo. ***Al aumentar el tamaño de las partículas que constituyen el suelo, aumentan los efectos fitotóxicos.*** Otro factor a tener en cuenta es el **potencial redox** ( $E_h$ ) del suelo.

### **2.3.3.3 Forma de ingreso del arsénico a la planta (*Toma de arsénico*)**

En raíces, todos los aniones son fuertemente adsorbidos a la superficie de la membrana, posteriormente sigue una conducción metabólica, una transferencia selectiva al ***simplasto*** y por último son transportados a la parte superior de la planta.

**En particular la adsorción del arsenito y del arseniato en la superficie radicular externa es bastante rápida e intensa**, obteniéndose de esta forma concentraciones muy altas de arsénico en las raíces de plantas que se desarrollan en cultivo hidropónico.

La velocidad del **proceso de adsorción-absorción** sigue el siguiente orden, de mayor a menor, en plantas de soya: ***arseniato, arsenito y compuestos orgánicos.***

El fosfato se encontró que era un poderoso inhibidor de la toma de arseniato (*compite con el arseniato*), siendo afectadas ambas fases de la toma.

**Este hecho nos indica que ambos iones son transportados por el mismo mecanismo** (el cual tiene una mayor afinidad por el fosfato que por el arseniato). Cuando el arseniato y el arsenito son suministrados a plantas sanas, ambas fases de la toma son aparentemente de 3 a 4 veces superiores para arseniato que para arsenito.

**Parece ser que la toma de arsenito es también un proceso metabólico, pero la vía de entrada a la planta no se ha establecido.** (6)

#### 2.3.3.4 Translocación

Una vez absorbido por la planta, los compuestos de As, **particularmente As (V)**, fluyen a través de la planta en pocas horas, moviéndose tanto **simplástica** (transporte activo de *citoplasma a citoplasma*) como **apoplásticamente** (*transporte extracelular*).

Los pasos a seguir por los citados compuestos cuando son absorbidos por la raíz:

**raíz → xilema → hojas → floema, hojas → floema → raíces, parte aérea, xilema.**

Si se absorben por vía foliar, se deberá acudir al paso adecuado.

El transporte de arsenito desde las raíces está limitado por su alta toxicidad para las membranas radiculares. El arseniato es más rápidamente adsorbido y translocado, debido a su menor toxicidad para las raíces. De tal forma, que si se trabaja con cantidades no letales de este último compuesto, se pueden observar concentraciones similares tanto en hojas como en raíces.

La translocación de los arsenicales orgánicos desde los tejidos foliares tratados es esencial, si el herbicida tiene una función metabólica. La superioridad de los **metanoarsoniatos** sobre el arsenito sódico como herbicida, yace en parte en su mayor translocación. Las rápidas lesiones del tratamiento foliar de arsenito sódico puede ser responsable de su menor transporte (el comportamiento de As(V) es muy similar a éste, pero con una translocación algo superior). Otros investigadores confirman el fenómeno de la exudación de compuestos de As (metilados o no) por parte de la raíz. **(6)**

#### 2.3.3.5 Metabolismo del arsénico

Como el arsénico es químicamente similar al fósforo, es probable que participe en muchas reacciones celulares. Compuestos organoarsenicales específicos, como arsenobetaína, arsenocolina o arsenolípidos se han encontrado en algunos organismos, y se ha demostrado que el arsénico reemplaza al fósforo en los grupos fosfatos del DNA. Sin embargo, la incorporación del arsénico en los procesos metabólicos en las plantas superiores ha recibido poca atención. El As (III) es tan tóxico que destruye todos los tejidos con los que entra en contacto, **probablemente por reacción con los grupos sulfhidrúlicos de las proteínas**, causando **degradación de membranas, disrupción de las funciones de la raíz** e incluso muerte celular y rápida necrosis si el contacto ha sido foliar. La acción del As (V) es más sutil y delicada; desacopla la fosforilación en la mitocondria, inhibe la absorción foliar de otros elementos químicos, y tiene un profundo efecto en los sistemas enzimáticos. Cuando se considera la variedad de reacciones en las plantas que incluyen grupos sulfhidrúlicos y fósforo, fácilmente se aprecia el número de vías en las cuales el arsenito y el arseniato pueden interferir en los procesos fisiológicos y bioquímicos que constituyen el crecimiento. **(5, 6)**

## CAPÍTULO III

### 3. DISPERSIÓN Y NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DEL ARSÉNICO EN CUERPOS RECEPTORES DE MAYOC - EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN

En el presente capítulo se hace necesario precisar los conceptos en base a los cuales se define el tema central, dispersión de arsénico en **cuerpos receptores**.

En el Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española (RAE) se define como:

**Cuerpo** (*del latín corpus*). Que tiene extensión limitada, perceptible por los sentidos.

**Receptor** (*del latín receptor, -oris*). Que recepta (recibe). Receptar: recibir, acoger.

**Ecosistema**. Comunidad de seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente.

En la legislación ambiental peruana se asume la designación de cuerpos receptores a los tres medios o ecosistemas: agua, aire y suelo.

#### CUERPO RECEPTOR

Es el ecosistema donde tienen o pueden tener destino final los residuos peligrosos ya tratados como resultado de operaciones de eliminación. Son cuerpos receptores las aguas dulces superficiales y subterráneas, la atmósfera, los suelos, las estructuras geológicas estables y confinadas. No se considerarán cuerpos receptores, las plantas de tratamiento ni de disposición final.

La emisión de contaminantes depende fundamentalmente de la actividad industrial que los produce y su dispersión en los diferentes cuerpos receptores -aire, agua y suelo- depende en gran medida de las **variables meteorológicas** que caracterizan la zona industrial y su entorno, especialmente para contaminación de aire. La presencia del contaminante en los cuerpos receptores se determina mediante los análisis químicos efectuados en lugares estratégicos de los mismos cuerpos, denominados **puntos de control**. Estos han sido previamente seleccionados por su ubicación y aprobados por la normatividad ambiental del sector industrial correspondiente. Pueden ser efectuados por la misma empresa y/o por empresas fiscalizadoras u otras entidades, a nombre del Estado. Los resultados analíticos obtenidos conforman los **registros de monitoreo**, si son producto de muestreos periódicos, de naturaleza histórica y se comparan con **valores estándares** (ECA, NMP) establecidos para preservar el ambiente y la salud, como valores de referencia.

**ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA):** Concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, en el aire, agua o suelo en su **condición de cuerpo receptor**, que no representan riesgos significativos para la salud de las personas ni del ambiente.

Nivel o **LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (NMP):** Concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que **caracterizan a un efluente o a una emisión**, que al ser excedido causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente.

**El cuerpo receptor está siendo contaminado** si la sustancia contaminante supera el valor ECA establecido. Si un efluente o emisión contiene sustancias cuyas concentraciones superan los NMP establecidos, está contaminando.

La dispersión de los contaminantes se estudia a través de los registros de los monitoreos.

En el presente capítulo se evalúa la **dispersión del arsénico proveniente de la actividad minero-metalúrgica en cuerpos receptores**.

*El año 1999 marca el inicio de las denuncias de los pobladores de Mayoc, que desencadenan años después, el cierre definitivo del depósito de relaves de Mayoc.*

### **3.1 Estándares de comparación en materia de salud y ambiente**

Los estándares sirven de referencia para comparar los valores hallados en las determinaciones o evaluaciones de contaminantes ambientales. De esta manera se determina si dichos contaminantes constituyen un riesgo para el ambiente y la salud.

#### **3.1.1 Estándares Nacionales**

##### **AIRE**

En el Perú, el sector de Energía y Minas, desde 1992 norma sus actividades en temas ambientales, siendo resaltable la implementación y fiscalización de los niveles máximos permisibles de compuestos presentes en efluentes y emisiones gaseosas.

Ver **Tabla Nº 3.1**.

**Tabla N° 3.1.- Niveles máximos permisibles en emisiones gaseosas**

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

(\*) 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:  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  \*

La tabla resume los **Niveles Máximos Permisibles (NMP)** de elementos y compuestos presentes en **emisiones gaseosas** provenientes de las **unidades minero-metalúrgicas**, según la **RM N°315-96-EM/VMM (19.07.96)**.

Así también, el 24 de junio del 2001 se aprueba el “**Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire**”. Ver **Tabla N° 3.2. (17)**

**Tabla N° 3.2.- Estándares Nacionales de calidad ambiental de aire**

Contaminantes	Período	Forma del Estándar		Método de Análisis <sup>1</sup>
		Valor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Formato	
<b>PM<sub>10</sub></b>	Anual	50	Media Aritmética Anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	24 horas	150	NE más de 3 veces/año	
<b>Plomo</b>	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

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

Según la definición de Estándar de Calidad Ambiental ECA (en la página anterior, 31) relacionada a la presencia de sustancias contaminantes en los cuerpos receptores, en la normativa nacional correspondiente, **NO FIGURA EL ARSÉNICO**.

## **AGUA**

El Decreto Supremo 002-2008-MINAM (Ministerio del Ambiente) en su Artículo 1º decreta la aprobación de los **Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua**, para establecer la concentración de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de **cuerpo receptor** y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo para la salud de las personas ni para el ambiente.

Los estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas, siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental. (Ver **Tabla Nº 3.3**)

**Tabla Nº 3.3.- Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua**

Parámetro	Unidad	Categoría 1: Poblacional Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales
		A1	A2	A3	
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,05	0,05 – 0,1

Fuente: D.S. 002-2008-MINAM

Aguas que pueden ser potabilizadas con: Desinfección (A1), Tratamiento convencional (A2), Tratamiento avanzado (A3). **(11)**

Este Decreto deroga los parámetros establecidos por la Ley General de Aguas, sin embargo, es esta última la ley aplicada durante la época en que acontecen los hechos mencionados y la búsqueda de la información. Por lo que se utiliza la ley anterior (LGA). Con la Ley General de Aguas (Ley Nº 17752, 12/12/1969), el Estado Peruano formula una política general de desarrollo y utilización del recurso agua. Ver **Tabla Nº 3.4**.

**Tabla Nº 3.4.- Valores límites de aguas según el uso**

Parámetros	Cursos de Agua						Unidades
	I	II	III	IV	V	VI	
<b>Arsénico</b>	0,10	0,10	0,20	1,00	0,01	0,05	mg/L
<b>Sólidos Flotantes</b>	0,00	0,00	0,00	Pequeña Cantidad	Moderados	--	
<b>Sólidos Suspendidos</b>	--	--	--	--	--	--	mg/L

Fuente: DL Nº 17752

La **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.

Finalmente se ha convenido que en las evaluaciones de 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° 3.5, N° 3.6, N° 3.7.**

### 3.1.2 Estándares internacionales y extranjeros referenciales

#### AIRE

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

**Tabla N° 3.5.- Estándares nacionales de calidad de aire ambiental (USEPA)**

Sustancia	Concentración Permitida en el Ambiente
<b>Partículas Totales Suspendidas (PTS)</b>	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio anual
	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio en 24 horas
<b>Partículas Finas (PM10)</b>	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° 3.6.- Límites máximos de contaminantes en el aire (Venezuela)**

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

Fuente: Decreto N°2.225 - Venezuela

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

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

**Tabla Nº 3.7.- Normas propuestas de calidad de aire ambiental (Ontario)**

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

### **3.2 Contaminación de aire**

La meteorología es el estudio de los fenómenos atmosféricos, especialmente para la previsión del tiempo. Los fenómenos atmosféricos son fundamentales para el estudio de la contaminación del aire por lo que a continuación se les describe brevemente.

#### **3.2.1 La atmósfera**

La atmósfera es una mezcla de gases que rodea un objeto celeste (como la tierra) que cuenta con un campo gravitatorio suficiente para impedir que escapen. Actúa como un regulador térmico, trae lluvia de los océanos, calor de los desiertos y trópicos, y frío de los polos. Es responsable de todos los estados del tiempo y tipos de clima que influyen en la vida de las plantas, los animales y el hombre. La atmósfera global está constituida aproximadamente por 78% N, 21% O y 1% Ar, así como por rastros de otros gases. **(34)**

#### **3.2.2 Métodos de Muestreo y análisis de los contaminantes del aire**

Entre las propiedades que posee el aire, es su capacidad para mantener la vida, la de mayor interés. 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 interesado en la contaminación del aire.

Las macro partículas de polvo constituyen la clase mayor y más evidente de contaminantes del aire. Su composición no está determinada sólo por la naturaleza de la industria que la provoca si no también por la naturaleza del terreno sobre el que se asienta.

Los contaminantes en macropartículas se suelen dividir 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.

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

Los instrumentos que recogen material particulado son colectores físicos, químicamente inertes, que permiten la medida del material recogido sin que importe su composición. Generalmente las macropartículas presentes serán diversos polvos minerales como óxidos metálicos, arenas, partículas de carbono, fibras de ceniza de arrastre y polen.

Las macropartículas pueden recogerse empleando equipo que se basa en uno o más de los principios explicados en la descripción de Toma de muestras de polvo sedimentable o de partículas en suspensión (Métodos HiVol sampler o PM10). **(22, 34)**

### 3.2.3 Registros de monitoreos meteorológicos

Los registros de las estaciones meteorológicas de Matucana, San José de Parac y San Mateo se resumen en la **Tabla N° 3.8**.

**Tabla N° 3.8. 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
		<b>EQUAS</b>	<b>09.99</b>	<b>13,6</b>
		<b>SGS</b>	<b>05-06.07.2000</b>	<b>12,2</b>
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
		<b>EQUAS</b>	<b>09.99</b>	<b>36</b>
		<b>SGS</b>	<b>05-06.07.2000</b>	<b>54</b>
Vientos:  Dirección y Velocidad	km/h	ONERN (Matucana)	1964-1971	SW
				13,4
		SENAMHI (Matucana)	1994	SSW
				6
		<b>EQUAS</b>	<b>09.99</b>	<b>SW</b>
				<b>8,66</b>
		<b>SGS</b>	<b>05-06.07.2000</b>	<b>SW-S</b>
		<b>6,5</b>		

Los datos son típicos de la región andina, confirman la característica de **clima frío seco**. La evaporación supera a la precipitación anual, incluyendo meses de lluvia (Ene.- Mar). La dirección predominante del viento en la zona es del SW, con velocidades bajas. **(33)**

### **3.3 Contaminación de agua**

Las aguas en condiciones naturales contienen materias extrañas en solución y suspensión, en proporciones variables, provenientes del terreno 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. **(7, 27)**

#### **3.3.1 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 algunos casos sin tratamiento o con tratamiento deficiente. La industria minero-metalúrgica emplea un volumen anual de agua superior a 400 millones de m<sup>3</sup>, el cual se utiliza en diversas etapas del proceso como: reactante, control de polvo, refrigeración y acarreo de residuos hacia lugares de confinamiento. Los procedimientos de muestreo y determinación de contaminantes siguen los requerimientos del Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua y de la Norma internacional 2540 D de APHA, AWWA y WPCF. **(1, 16)**

### **3.4 Contaminación del suelo**

#### **3.4.1 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. Se han establecido algunos términos con los cuales se puede medir el grado de contaminación:

- Biodisponibilidad.- Es la asimilación del contaminante realizada por los organismos que habitan y conforman la biota del suelo. También se puede definir como el grado de libertad en que se encuentran los metales para ser absorbidos por un organismo. Depende de varios factores: solubilidad, pH, potencial óxido-reductor, contenido y tipo de arcillas, materia orgánica, etc. Depende además de la forma química y física del elemento y de la capacidad de los organismos para absorberlo.
- 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.

### 3.4.2 Registros de muestreos de suelo

En Febrero del año 2000 como parte de las evaluaciones encargadas por el Estado, Consultcont toma cinco (05) muestras de suelos (1-T a 5-T) en los alrededores del fundo Glorieta de Mayoc, y una (01) muestra en el entorno de la Posta Médica de Tamboraque. Las muestras corresponden a excavaciones de 30 cm de profundidad.

En la **Tabla Nº 3.9** se muestran los resultados de los análisis químicos realizados.

**Tabla Nº 3.9.- Registro 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***

\* Pasta preparada con L/S: 1.0;

\*\* American Society of Agronomy 1982

\*\*\* Suelo minero rehabilitado para uso agrícola

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

La muestra de suelo **6-T** correspondiente al suelo del entorno de la Posta Médica de Tamboraque 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. **(18, 28)**

### 3.4.3 Registros de caracterización de relaves

El tratamiento integral de los minerales sulfurados en la planta Tamboraque generaba tres tipos de relaves y un concentrado de piratas con mínimo contenido valioso, que finalmente también se dirigía al mismo almacenamiento. Las características de dichos relaves se presentan en las **Tablas Nº 3.10 y Nº 3.11**.

**Tabla Nº 3.10.- Características de la mezcla de relaves a ser compactados**  
**Análisis granulométrico-químico - Planta Tamboraque**

Nº 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	<b>Arsénico</b>	<b>mg/kg</b>	<b>42 062,5</b>
+ 100	5,33	<b>Plomo</b>	<b>mg/kg</b>	<b>616,25</b>
+ 140	13,33	Zinc	mg/kg	17,6
+ 200	10,54	<b>Cadmio</b>	<b>mg/kg</b>	<b>3 418,75</b>
- 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.

Las partículas de relave principalmente tienen un tamaño menor a la correspondiente a la malla 200, presente en un 60% y un contenido porcentual de As de 4,2%, constituyéndose en la concentración más elevada después del Fe.

**Tabla N° 3.11.- Características de relaves almacenados (Fuente: NMLPSA)**

PRODUCTO	SÓLIDOS TM/día	G.E.	LÍQUIDOS m <sup>3</sup> /día	pH	ANÁLISIS GRANULO- MÉTRICO		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	<b>%As</b>	<b>0,400</b>
					m-400	30,5	Oz/TM Ag	--
					m-200	62,0	Oz/TM Au	--
						%Insolub.	93,00	
RESIDUO NEUTRA- LIZADO (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	<b>%As</b>	<b>9,700</b>
					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	<b>%As</b>	<b>5,400</b>
					m-400	73,8	Oz/TM Ag	1,2
					m-200	98,3	Oz/TM Au	0,096
						%Insolub.	--	
CONCEN- TRADO DE PIRITAS	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	<b>%As</b>	<b>1,900</b>
					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	<b>%As</b>	<b>0,530</b>
					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.

### 3.5 EVALUACIÓN DEL ARSÉNICO EN LOS CUERPOS RECEPTORES DE MAYOC

Los niveles de exposición al arsénico en los cuerpos receptores de Mayoc se estudian a través de los registros de monitoreos efectuados en agua, aire y suelo de la zona, durante los años de 1999 a 2006. El periodo indicado se divide en **4** etapas para una mejor presentación de la información obtenida:

- ◇ Desde **finés del 1998 hasta el 2000**, periodo en que se da la operación del depósito de relaves de Mayoc y los reclamos de los pobladores de Glorieta de Mayoc y Daza. Los reclamos continuos finalmente generan una denuncia legal.
- ◇ Del **2000 a 2004**, años en los que se lleva a cabo una serie de inspecciones por parte de la autoridad competente y a cargo de las denominadas EAI (Empresas de Auditoría e Inspectoría) adscritas al Ministerio de Energía y Minas. Además de este tipo de inspecciones ambientales hubo otras dirigidas a evaluar los impactos en la salud de la gente, llevadas a cabo por DIGESA (Evaluación de Riesgos emitida por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) en 2001).
- ◇ Del **2005 a principios del 2006**, etapa en que se decide momento, lugar y modalidad de remoción de los relaves de Mayoc, traslado de los mismos, además de la presentación del Plan de Cierre del depósito de relaves de Mayoc.
- ◇ Abril del **2006**: Auditoría ambiental de verificación de la ejecución del Plan de Cierre del depósito de relaves de Mayoc.

A los **registros de Monitoreos por estaciones de control en Calidad de Agua y Calidad de Aire desde Diciembre de 1998 hasta Abril del 2006**, distribuidos en las 4 etapas mencionadas, se incluyen los resultados obtenidos en el Informe de Verificación de condiciones ambientales en Mayoc en el año 2001.

#### 3.5.1 Inspección especial de Verificación de condiciones ambientales del Depósito de Relaves Mayoc

Efectuada por D&E Desarrollo y Ecología S.A.C. por orden del Ministerio de Energía y Minas (MEM) en el 2001 tuvo como **objetivo primordial** la **salud de los pobladores de la zona** y la importancia de generar la paralización del depósito de relaves de Mayoc.

### 3.5.2 Registros de monitoreo (1999-2006) en cuerpos receptores de Mayoc

Al inicio de las diferentes inspecciones a lo largo de ocho años, los puntos de control de los monitoreos aprobados por la normativa ambiental son numerosos. Los **Puntos de Control de los monitoreos en Agua** aprobados en el **año 1998**, son 9 (P-1, P-1A, P-1B, P-4, P-5, P-5A, P-13, P-13A y P-14), y son 4 los puntos de control de emisiones de **efluentes líquidos** (P-3, P-10A, P-11, P-16).

*El número de puntos de control se reduce con el tiempo, porque los procesos generan contaminantes por debajo de los niveles establecidos por la normativa ambiental del sector y se llega al estado en que hay muy pocos efluentes.*

Las Estaciones o Puntos de Control en CALIDAD DE AGUA se reducen a cinco durante 2003 y 2004, los años de inspecciones por denuncias: **P-5, P-5A, P-13, P-13A y P-14**.

De estos 5 puntos quedan sólo 3 en las últimas inspecciones, durante la remoción y Plan de Cierre de la relavera, **P-5, P-5A y P-13A**.

Los Puntos de Control en CALIDAD DE AIRE son cuatro durante los años 99 y 2000. Se reducen a dos durante las fiscalizaciones de los años 2003 y 2004, quedando tres puntos en la época del Plan de Cierre. (Ver **Plano N° 3.1**)

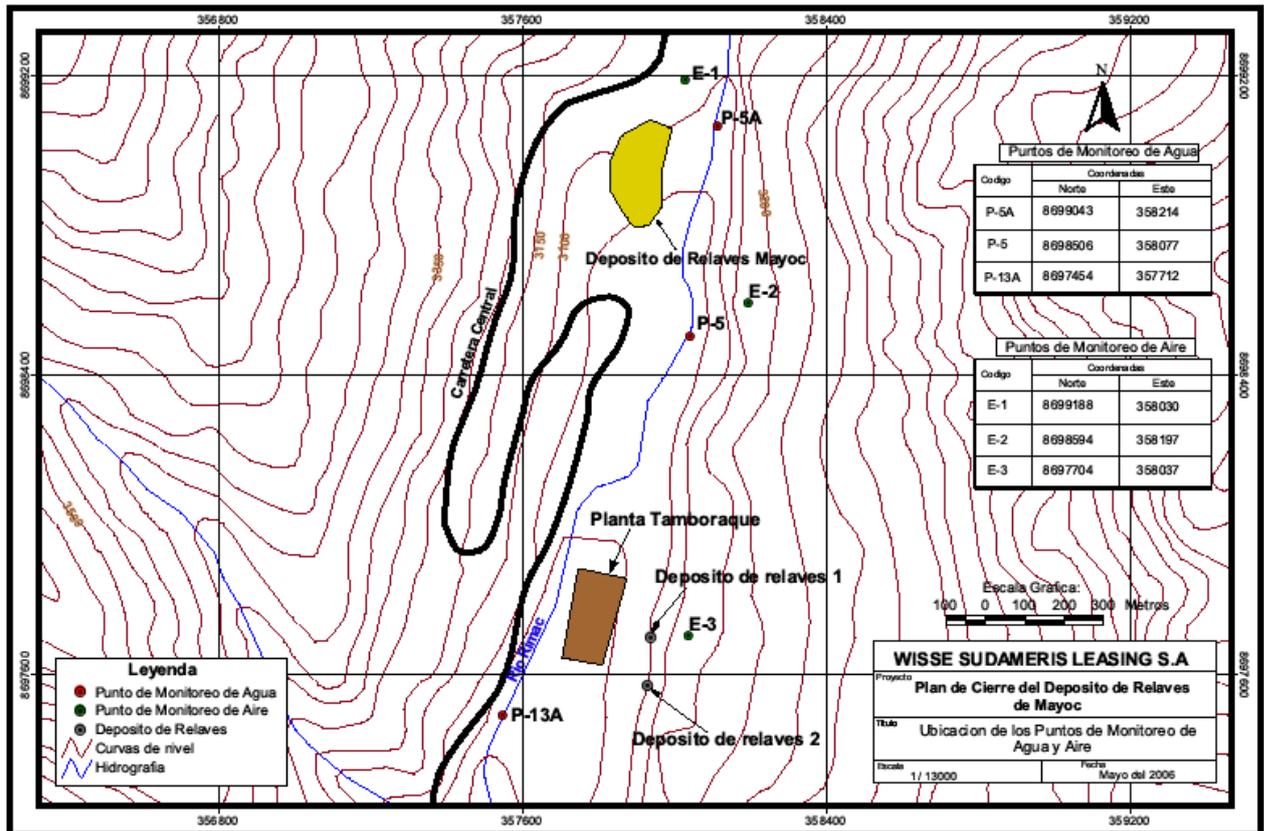
En cuanto a Calidad de Suelos los registros de **muestreos** son del año 2000, después se tiene información de fiscalizaciones en el año 2004 por dos empresas (Golder y BO Consulting) y las últimas durante el período 2005 y 2006. En cada una de las evaluaciones mencionadas se ubican diferentes puntos de muestreo, a criterio de los profesionales y a falta de pautas establecidas por la normativa ambiental del sector.

Para la caracterización de relaves con fines comparativos se incluyen los registros de muestreo de fiscalizaciones posteriores a los ya presentados. Son los estudios efectuados por Golder (2004) y SVS (2005) antes de la inertización y traslado de los relaves.

Con el fin de centrar la información en el hecho que los suelos son los contaminados y poder proponer la alternativa de limpieza de los mismos por **fitorremediación**, todos los resultados mencionados se han consolidado en una tabla Resumen que contiene el **Rango** de los Contenidos Promedio de **Arsénico** (menor y mayor concentración) en los cuerpos receptores en las diferentes inspecciones, durante el tiempo indicado en cada caso. La información arriba mencionada por etapas se halla en el **Anexo N° 3.1**.

### Plano N° 3.1.-

Ubicación de los puntos de monitoreo de Agua y Aire  
Plan de Cierre



### 3.5.3 Rango de Contenidos Promedio de Arsénico en los cuerpos receptores a través de las diferentes inspecciones

Para establecer la contaminación de suelos en la zona de Mayoc, en comparación con los otros cuerpos receptores, se incluye el **Rango** de los Contenidos Promedio de **Arsénico** (menor y mayor concentración) en los cuerpos receptores en las diferentes inspecciones, durante el tiempo indicado en cada caso.

Toda esta información se resume en la Tabla N° 3.12.

**Tabla N° 3.12.- Rango de los Contenidos Promedio de As  
(menor y mayor concentración) en los cuerpos receptores  
a través de las diferentes inspecciones**

Medio	Período	As
Aguas	Dic. 98 – May 2000	0,06 – 0,12 ppm
	<b>2001:</b>	<b>&lt; 0,01 ppm</b>
	2003-2004	0,015 – 0,042 ppm
	2005-Feb 2006	0,015 – 0,05 ppm
	Abril 2006	0,03 ppm
<b>ECA: 0,01 - 0,05 - 0,1 (D.S. 002-2008-MINAM)</b>		<b>0,1 – 0,2 ppm (DL N° 17752-LGA)</b>
Aire	1999	0,1 – 0,5 ug/m <sup>3</sup>
	2000	0,006 – 0,45 ug/m <sup>3</sup>
	<b>2001</b>	<b>0,05-0,09 ug/m<sup>3</sup> - 0,26 - 0,79 g/k (PTS)</b>
	2003 - 2004	0,01 – 0,033 ug/m <sup>3</sup>
	2005 – Mar 2006	0,01 – 0,05 ug/m <sup>3</sup>
	Abril 2006	0,07 – 0,08 ug/m <sup>3</sup>
<b>ECA: 0,3 ug/m<sup>3</sup></b> (en 24 horas) según las normas de Ontario porque en la normativa nacional sólo se ha aprobado los NMP para As en aire (R.M. N° 315-96 EM/VMM).		
Suelos	1999 - 2000	Entre 0,2 y 1,2 g/k
	<b>2001</b>	<b>0,33 - 0,36 g/k</b>
	2004	0,002 – 1,5 g/k
	2005	0,06 – 0,42 g/k
	Enero 2006	0,02 – 1,4 g/k
	Abril 2006	0,12 – 4,1 g/k
Año 2006: los valores indicados corresponden a diferentes profundidades del suelo donde estuvo el relave de Mayoc.		
<u>Valores referenciales:</u>		
<b>0,002%</b> (American Society of Agronomy, 1982); [ <b>20 ppm = 20 mg/kg</b> ]		
<b>1-40 mg/kg</b> (I. Thornton y M. Farago, The Geochemistry of Arsenic, OMS, 2000)		
<b>27000 mg/kg</b> (Valor máximo reportado en áreas contaminadas por residuos mineros o refinerías).		
Relaves	1999-2000	42 g/k (antes de compactarse); ~ 5 g/k (almacenados)
	<b>2001</b>	<b>Entre 16 y 25 g/k</b>
	2005	~ 10 g/k
Según la información recopilada los relaves han presentado una composición mayoritaria característica de <b>partículas menores (malla-200) con un mayor contenido de arsénico.</b>		

En el año 2005 los valores de los rangos indicados corresponden a diferentes profundidades de zonas del suelo donde estuvo el relave de Mayoc.

Se resalta en **negrita** los resultados de la inspección especial en el 2001.

## CAPÍTULO IV

### 4. EVALUACIÓN DEL ARSÉNICO EN LA POBLACIÓN DE MAYOC Y SUS EFECTOS

La salud de los pobladores de Mayoc y lugares aledaños, en San Mateo, afectada por efecto del arsénico se evalúa a través de diferentes estudios publicados. La investigación bibliográfica realizada, sobre casos de enfermedades asociadas a elementos como arsénico y metales pesados, producidos por la actividad minera conduce a información específica sobre los pobladores de Mayoc y zonas aledañas, expuestos a los impactos negativos generados por la presencia del depósito de relaves de Mayoc y por la actividad minero-metalúrgica en Tamboraque.

*La salud y bienestar del ser humano será en el futuro el parámetro principal para evaluar la **sustentabilidad** de toda actividad industrial o artesanal.*

#### 4.1 Metabolismo y efectos del arsénico sobre el organismo humano

El arsénico se distribuye por todo el organismo: hígado, riñones, bazo, piel, músculos, tejido óseo, tejido nervioso, útero, etc. Los **compuestos inorgánicos del arsénico son los más nocivos**; los compuestos del arsénico trivalente son mucho más tóxicos que los del arsénico pentavalente. La tolerancia en el hombre puede inducirse por desarrollo gradual del hábito. En la **Tabla Nº 4.1** se resume los efectos tóxicos del arsénico en sus estados de oxidación (+3,+5). (4)

**Tabla Nº 4.1.- Toxicidad genética del Arsénico**

Estado de oxidación	Carcinogenicidad humanos	Mutagenicidad Porcariotes – Eucariotes	Reparación ADN	Efectos cromosómicos	Transformaciones de células animales
Pentavalente	--		+	+	
trivalente	+	+	+	+	+

#### 4.2 Zonas de evaluación del arsénico en la población de Mayoc

Las zonas de evaluación corresponden a diversas localidades del distrito de San Mateo en donde se han presentado diferentes casos de intoxicación por arsénico en los pobladores. Las evaluaciones en su mayoría, han sido por encargo del Estado, como el caso de DIGESA, o por interés científico, como es el caso de las publicaciones de la Sociedad Peruana de Dermatología o de la Universidad de San Marcos.

Las comunidades objeto de diferentes evaluaciones son Mayoc, Daza, Pite, Marpa, San Mateo, Ayar bajo y Tamboraque. En la **Figura Nº 4.1** se muestra la ubicación geográfica.

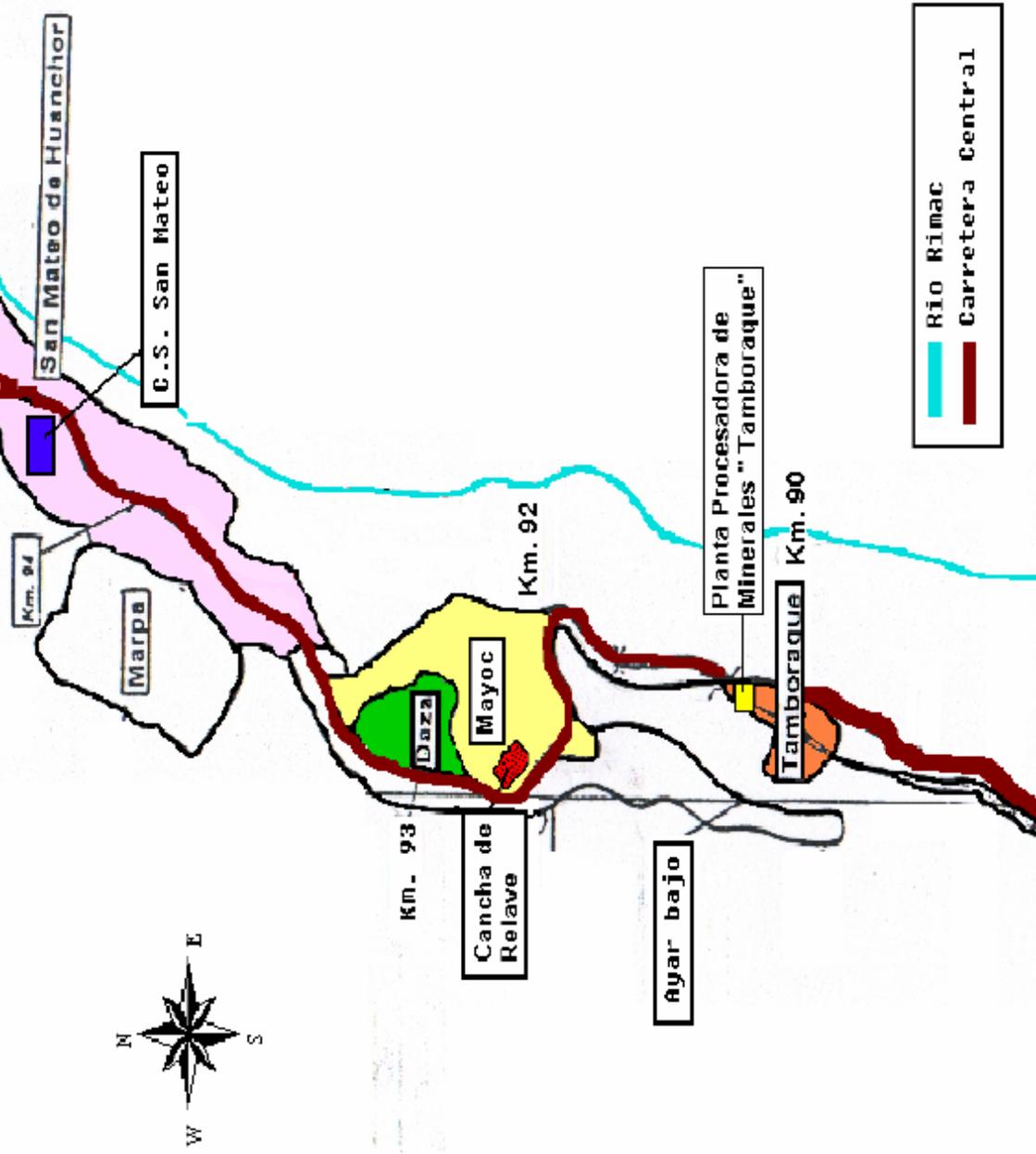


Figura N° 4.1.-

**CENTROS**  
**POBLADOS**  
**EXPUESTOS AL**  
**RELAVE DE MAYOC**  
**EN SAN MATEO**  
 Curso Internacional  
 de Emergencias  
 Toxicológicas  
**INTOXICACIONES**  
**POR METALES**  
**PESADOS**

Lima, julio de 2007.

Dirección General de  
 Salud Ambiental  
 (DIGESA)  
 Ministerio de Salud

#### **4.3 Resultados de las evaluaciones de arsénico en pobladores de Mayoc y zonas aledañas en San Mateo de Huanchor**

La información se ordena cronológicamente de acuerdo a los tipos de evaluaciones, estatales, particulares o científicas. Para revisar los resúmenes ver **Anexo N° 4.1**.

##### **4.3.1 Informes de evaluaciones realizadas por entidades estatales de salud**

- ***Informe de Inspección a la Empresa Minera LIZANDRO PROAÑO S.A. – “PROYECTO TAMBORAQUE”, 19-V-1999. Informe #441-99/DIGESA/DEEMA, Ministerio de Salud, Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA).***
- ***Evaluación Ambiental de la Cancha de Relaves de Mayoc e Inmediaciones, DIGESA, 22 Julio 1999.***
- ***Evaluación Ambiental realizada en la zona aledaña a la cancha de relaves de la minera Lizandro Proaño S.A., Ministerio de Salud, (DIGESA), Octubre 2000.***
- ***Informe de riesgos de salud en San Mateo de Huanchor, DIGESA, 2000.***
- ***Monitoreo de los Niveles de Exposición por Metales Pesados en la Población de San Mateo de Huanchor, Ministerio de Salud, Dirección de Salud IV Lima Este, 30 Octubre 2001, Oficio No. 1497 – DISA IV LE /DESA-2001.***
- ***Informe N° 603-2003-MEM-DGM/TNO, numeral 5, del 03 de octubre del 2003.***

##### **4.3.2 Informes de evaluaciones realizadas por entidades particulares**

- ***Estudio exploratorio: Situación ambiental y Salud de las comunidades expuestas a contaminación por metales pesados de las actividades mineras. Cuenca media y alta del Río Rímac. Instituto de Salud y Trabajo, Julio 2003.***

##### **4.3.3 Informes de evaluaciones realizadas por entidades científicas con fines de investigación en medicina y salud**

- ***Enfermedades Dermatológicas de Tipo No Infeccioso Asociadas a Exposición Crónica a Metales Pesados de Relaves Mineros. Estudios de Casos y Controles. San Mateo de Huanchor, Lima. Septiembre-Diciembre 2003. Facultad de Medicina San Fernando, UNMSM.***
- ***Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico? W. Ramos et al. Sociedad Peruana de Dermatología, 2006. (10, 23)***

#### 4.4 Casos detallados de evaluación de arsénico en pobladores de Mayoc

##### 4.4.1 Informe de riesgos de salud en San Mateo de Huanchor, DIGESA, 2000.

Parte de la evaluación de salud se centró en el análisis de arsénico en fluidos biológicos (orina) de algunos habitantes en Mayoc. (Ver **Anexo 4.2**)

##### 4.4.2 Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico? – Dr. Willy Ramos et al., Sociedad Peruana de Dermatología, 2006.

Los pobladores expuestos a relaves mineros como consecuencia de la exposición crónica al arsénico desarrollan lesiones cutáneas de tipo queratosis como parte de las **dermatosis arsenicales**. Las queratosis arsenicales son **lesiones preneoplásicas** que constituyen la manifestación más frecuente de dermatosis arsenical, que adoptan una distribución principalmente palmoplantar, aunque pueden presentarse en tórax y áreas no expuestas al sol. En algunos lugares coexiste arsenicismo con otros factores ambientales que pueden actuar desencadenando queratosis y/o exacerbando las existentes.

Este es el caso del **daño actínico crónico** que puede desencadenar distintas lesiones y dentro de ellas las **queratosis actínicas**, lesiones preneoplásicas que se desarrollan como consecuencia de la exposición prolongada a la luz solar y deben ser tratadas por el riesgo de su conversión a carcinoma de células escamosas. (Ver **Foto Nº 4.1**).



**Foto 4.1** Queratosis arsenicales palmoplantares y torácica en pobladora expuesta a relaves mineros en altura.



**Foto 4.2** *Dermatitis y queilitis actínica en pobladora expuesta a relaves mineros y altura en San Mateo de Huanchor.*

El daño actínico crónico se evidenció en todos los pacientes: El 100% de los pobladores con diagnóstico de queratosis arsenical presentó dermatitis actínica en región facial; el 62,5%, queratosis actínica y el 25%, queilitis actínica (Ver **Foto N° 4.2**).

Todos los pacientes presentaron al menos un diagnóstico relacionado a daño actínico crónico independientemente de las lesiones arsenicales, por lo que se plantea que **muchas lesiones causadas deben haber sido modificadas por la radiación solar, lo cual resultaría en un efecto sinérgico para el desarrollo de cáncer de piel.**

Las **lesiones actínicas pueden haber sido modificadas** por exposición al arsénico. Hasta ahora se desconoce el significado de estos hallazgos y sus implicancias en el riesgo de desarrollo de cáncer de piel no melanoma, sin embargo, el presente trabajo es un primer acercamiento para tratar de encontrar una respuesta a este problema. **(26)**

#### **4.5 Normas legales nacionales sobre salubridad en el sector minero-metalúrgico**

El **artículo 67° de la Constitución Política vigente** señala que la política nacional del ambiente la determina el Estado. A fin de hacer posible el desarrollo integral de la personalidad humana, consagra ***el derecho de toda persona a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de su vida*** (Inciso 22-Art.2°).

La **Ley Orgánica de Municipalidades (Ley N° 27972, 27/05/2003)** establece que les corresponde a estas, planificar, ejecutar e impulsar a través de organismos competentes, el conjunto de acciones destinadas a ***proporcionar al ciudadano el ambiente adecuado para la satisfacción de sus necesidades vitales de vivienda, salubridad, abastecimiento, educación, recreación, transporte y comunicaciones*** (Art. N° 73).

## CAPÍTULO V

### 5. FITORREMEDIACIÓN en suelos de Mayoc contaminados con arsénico

Los valores de As en suelos de Mayoc indican que la generalidad de estos en la zona cultivada aguas arriba del depósito de relaves, presentan una concentración anormal por exceso. Según la Agencia de Protección Ambiental de Suecia, una **concentración total de As > 40 mg kg<sup>-1</sup>**, indica suelos contaminados **(27)**. Por lo que se propone la técnica de FITORREMEDIACIÓN para disminuir la dispersión de As en los suelos de Mayoc.

#### 5.1 Descontaminación de suelos

Existen técnicas de diversas clases para la recuperación de los suelos contaminados. Las técnicas o métodos tradicionales se caracterizan por una recuperación del suelo, rápida pero costosa.

Los métodos alternativos son relativamente más recientes y están relacionados con procesos **denominados naturales, biológicos** o de **biorremediación**.

Estas técnicas químicas, físicas y biológicas se agrupan en dos categorías:

- a) **in situ**, remedia el suelo contaminado sin la remoción del mismo.
- b) técnicas **ex situ**, los suelos contaminados requieren ser removidos del sitio.

Las técnicas *in situ* tienen mayores ventajas que las de *ex situ* debido a su bajo costo y a su reducido impacto en el ecosistema.

#### 5.1.1 Técnicas tradicionales de recuperación de suelos contaminados

##### Métodos físicos tradicionales

Las **estrategias físicas** de remediación más utilizadas para eliminar y/o reducir los contaminantes del suelo son: extracción, sellado, incineración, excavación. Muchas de estas tecnologías son costosas ya que su precio estimado de la recuperación de suelos en **Estados Unidos de América** fue aproximadamente **de 1-2 millones USD (Dólar norteamericano) en 1997, incrementándose a 15-25 millones en el 2000 y probablemente 70-100 millones en 2005.**

Ciertas técnicas especializadas pueden exceder de **1000 dólares/Ton**, la excavación de contaminantes, tiene un costo promedio de un millón de dólares/acre y su eficacia es moderada, destruyendo la estructura del suelo así como su fertilidad, o la más lamentable, esparciendo la contaminación a sitios no contaminados.

Existen diversos tipos de remediación de suelos:

**Por extracción.-** Técnicas pueden variar de acuerdo a las soluciones de lavado o extractoras y a los procesos combinados. Las más conocidas son: Soil Washing, Soil Vacuum, Soil Venting.

**Por sellado.-** trata al suelo con agente que lo encapsula y lo aísla.

**Por incineración.-** Técnica apropiada para el tratamiento de residuos cuya naturaleza es principalmente, orgánica y combustible.

#### Métodos químicos tradicionales

Las **estrategias químicas** de remediación más utilizadas son:

**Tratamiento químico.-** Degradación de los contaminantes del suelo por reacciones químicas. Frecuentemente mediante oxidación de compuestos orgánicos.

**Tratamiento electroquímico.-** Procedimiento *in situ* en que los contaminantes se desplazan mediante campos eléctricos. Uso de electrodos a suficiente profundidad.

La descripción más amplia de los métodos tradicionales se encuentra en el **Anexo 5.1**.

#### **5.1.2 Remediación de suelos por métodos biológicos - Biorremediación**

Se ha demostrado que los métodos tradicionales para la remediación de sitios contaminados, además de ser costosos, a menudo no son eficaces.

La capacidad de ciertos microorganismos de degradar contaminantes orgánicos como hidrocarburos originó el término " **biorremediación**", aplicado genéricamente a un grupo de técnicas que utilizan procesos biológicos para la remediación de suelos y aguas, que son más efectivas y de bajo costo. El objetivo básico de la biorremediación es promover los procesos naturales (atenuación natural) y desarrollar técnicas para acelerar estos procesos en la recuperación de suelos y sedimentos contaminados.

Los **procesos biológicos involucran bacterias, hongos, algas, enzimas, así como plantas superiores incluyendo árboles**. Además de metabolizar y degradar compuestos orgánicos, los microorganismos son capaces de absorber compuestos inorgánicos tóxicos, inmovilizándolos, y pueden inhibir y/o catalizar diversas reacciones, ampliándose por lo tanto su campo de aplicación.

El biorremedio aprovecha la diversidad y versatilidades genéticas de los microorganismos para producir rupturas o cambios moleculares en los contaminantes generando compuestos de menor o ningún impacto ambiental.

Estos cambios ocurren usualmente en la naturaleza, sin embargo su velocidad es baja.

Mediante una adecuada manipulación, estos sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y así usarlos en sitios con una elevada concentración de contaminantes, en suelos, aguas y aire.

Una gran cantidad de contaminantes como plaguicidas, herbicidas, petróleo, gasolina y metales pesados pueden ser eliminados por biorremediación.

Al incremento del uso de la biorremediación como una estrategia sostenible y económica, se le está prestando una particular atención, principalmente en Europa y Estados Unidos de América. **(2, 20)**

### **5.1.3 Clases de técnicas de BIORREMEDIACIÓN**

◇ Según los procesos mediante los cuales funciona, la biorremediación se puede dividir en 3 grupos: Degradación enzimática, remediación microbiana y **fitorremediación**.

#### ***Degradación enzimática***

Consiste en la utilización de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Dichas enzimas son previamente producidas en bacterias transformadas genéticamente con el gen que codifica para cada enzima en particular. Esta aplicación de la biotecnología lleva décadas en el mercado y hoy en día las compañías biotecnológicas ofrecen las enzimas y también los microorganismos genéticamente modificados.

#### ***Remediación microbiana***

Uso de los microorganismos directamente en el foco de contaminación.

Estos microorganismos pueden ya existir en ese sitio o pueden ser originarios de otros ecosistemas en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado (inoculación).

En el primer caso, muchas veces suelen administrarse más nutrientes (adición de nutrientes) al medio con el fin de acelerar el proceso de biodegradación.

Otra posibilidad es la de introducir cepas modificadas por técnicas de ingeniería genética, a las cuales se les introdujo el gen que codifica para una o más enzimas detoxificadoras (Uso de microorganismos modificados genéticamente). **(2, 12)**

***FITORREMEDIACIÓN.***- Conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas.

- ◇ Según el lugar de aplicación se clasifican en técnicas *in situ* y *ex situ*.

#### Técnicas *IN SITU*

**Biorremediación.-** Estimulación de la actividad de microorganismos del suelo (o inoculados) mediante la circulación de soluciones acuosas ricas en nutrientes o productos enmendantes y saturadas en oxígeno disuelto.

**Bioaumentación.-** Introducción en el suelo de organismos seleccionados, adaptados o genéticamente modificados para degradar contaminantes específicos.

**Bioventing.-** Inyección (o extracción) forzada de aire para incrementar la concentración de oxígeno y estimular la biodegradación. Utiliza bajas tasas de flujo (diferencia con Soil Vacuum Extraction (SVE)).

#### Técnicas *EX SITU*

**Biopilas.-** Mezcla de suelo contaminados y suelo enmendados, y confinamiento en montones estáticos sometidos a aireación (inyección o vacío) y recogida de gases y lixiviado para su tratamiento.

**Compostaje.-** Mezcla de suelo contaminado con materiales porosos y enmiendas orgánicas (serrín, paja, estiércol, restos vegetales) con el fin de promover la biodegradación (incremento de temperatura).

**Landfarming.-** Disposición del suelo contaminado en capas lineales y remoción periódica para favorecer la aireación, también se mejoran las condiciones para estimular la biodegradación (humedad, nutrientes, etc.)

**Lodos.-** Mezcla de suelos contaminados con lodos, agua y aditivos, para favorecer la biodegradación al incrementar el contacto entre los microorganismos y el contaminante, dentro de un "bio-reactor". (12)

## 5.2 FITORREMEDIACIÓN (Remediación Verde)

El concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, desde hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales (plantas acuáticas en aguas contaminadas con plomo, cobre, cadmio, hierro y mercurio).

La remediación de la acumulación de metales pesados en suelos utilizando plantas es también ampliamente reconocida. En Rusia en los años 60 se ha investigado la recuperación de suelos contaminados con radionucleótidos.

Dentro de las técnicas biológicas o ecológicas, el uso de plantas se considera potencialmente capaz de dar soluciones *in situ*.

Aunque el conocimiento básico de que las plantas pueden ser usadas para remediación del ambiente ha sido conocido desde décadas pasadas, sólo recientemente ha sido reconocido completamente el valor de las **plantas acumuladoras de metales** en la recuperación de suelos contaminados. Es una técnica que se encuentra todavía en etapa de investigación y desarrollo, el número de pruebas de campo es pequeño.

Actualmente se estudia la descontaminación de suelos, sedimentos y agua, originada por sustancias tóxicas, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de acumular contaminantes como solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados y no metales, explosivos, elementos radiactivos, fertilizantes, entre otros, haciéndolos más biodisponibles para la planta.

Este proceso denominado "**fitorremediación**" consiste en la *remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos tóxicos*.

La fitorremediación (del griego "**phyto**" o "planta"), también llamada FITOLIMPIEZA o FITOCORRECCIÓN, incluye cualquier *proceso biológico, químico o físico, inducido por las plantas, que ayude en la absorción, degradación y metabolización de los contaminantes, ya sea por las plantas mismas o por los microorganismos que se desarrollan en la rizósfera*.

### **5.2.1 Clasificación de las técnicas de Fitorremediación**

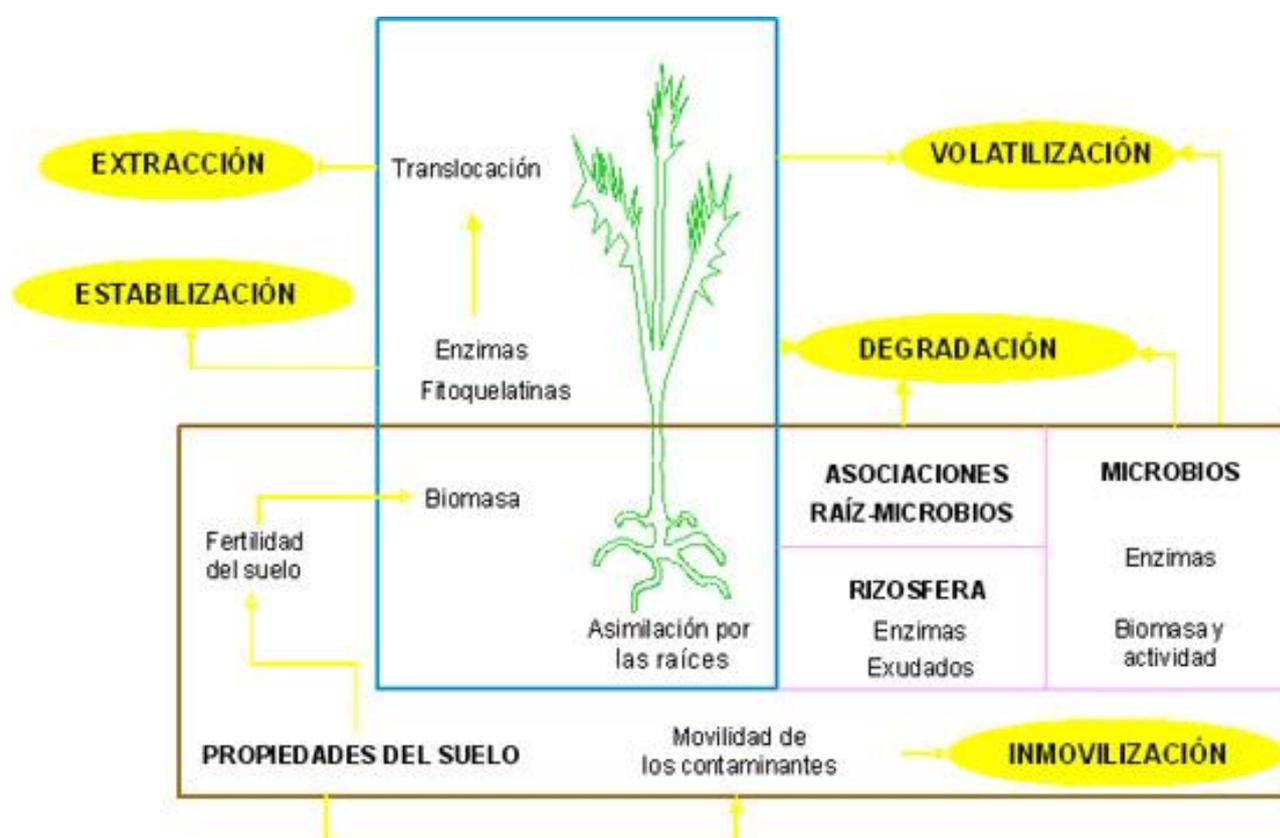
La fitorremediación contempla seis procesos básicos a través de los cuales las plantas pueden contribuir a la recuperación de suelos, sedimentos y aguas contaminadas. Dependiendo de la estrategia de recuperación, los procesos darán lugar a dos tendencias o comportamiento de los contaminantes del suelo, que son la eliminación o la retención de los mismos. (Ver **Figura Nº 5.1**).

#### Eliminación de contaminantes

**Fitoextracción.**- acumulación de los metales en las partes cosechables de las plantas y su eliminación del medio. Conocida también como fitoacumulación, es la **captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas**.

Algunas plantas absorben cantidades extraordinarias de metales en comparación con otras. Se selecciona una de estas plantas o varias de este tipo y se plantan en un sitio según los metales presentes y las características del lugar. Después de un tiempo, cuando las plantas han crecido, se cortan y se incineran o se deja que se transformen en abono vegetal para reciclar los metales.

Este procedimiento se puede repetir la cantidad de veces que sea necesario para reducir la concentración de contaminantes en el suelo a límites aceptables. Al incinerar las plantas, las cenizas deben colocarse en un vertedero para desechos peligrosos, siempre que la ceniza sea sólo un 10% del volumen de los desechos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo.



**Figura Nº 5.1.-** Procesos implicados en la fitorremediación de suelos contaminados  
Fuente: M. P. Bernal et al.; Ecosistemas 16 (2), Mayo 2007

**Fitovolatilización.-** se produce a medida que los árboles y otras **plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos**. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse en la atmósfera. Los álamos, por ejemplo, evaporan el 90% de los contaminantes que absorben. Los árboles pueden realizar una acción de bombeo orgánico cuando sus raíces se extienden hacia la napa freática, formando una masa densa de raíces que absorbe una gran cantidad de agua. Los álamos absorben 113 litros de agua por día, y hay una variedad **Populus deltoides** que absorbe hasta 1325 litros por día. La acción de bombeo de las raíces disminuye la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea y el agua potable.

Los álamos plantados a lo largo de cursos de agua reducen el exceso de fertilizantes y herbicidas. Árboles plantados en vertederos como sustitutos orgánicos de la tradicional capa de arcilla o de plástico absorben agua de lluvia que, de lo contrario, se filtraría por el vertedero y llegaría al fondo en forma de "lixiviado" contaminado.

**Fitodegradación.-** Conocida también como Fitotransformación. Es el metabolismo o degradación enzimática de contaminantes orgánicos en el interior de la planta, transformándolos en no-tóxicos o disminuyendo su toxicidad (*incluye la fitovolatilización*).

**Rizofiltración.-** es una técnica prometedora para abordar el problema de la contaminación del agua con metales. Similar a *la fitoextracción*, pero **en lugar de suelo las plantas que se usan para la limpieza se cultivan en invernaderos con las raíces en agua**. Cuando las plantas tienen un sistema radical bien desarrollado, el agua contaminada se transporta hasta las plantas y las **raíces absorben el agua con los contaminantes**.

A medida que las raíces se saturan de contaminantes, se cortan y se eliminan. Además de extraer metales del agua, la rizofiltración puede ser útil para descargas industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radiactivos. El girasol fue utilizado en la extracción de radiactivos en Chernobyl, Ucrania.

#### Retención de contaminantes

**Fitoestabilización.- reduce la movilidad de los contaminantes** y su biodisponibilidad hacia la cadena alimenticia, previene migración de metales a aguas subterráneas o aire. También se utiliza para reforestar sitios muy contaminados que carecen de vegetación. Las plantas tolerantes a metales se utilizan para restaurar la vegetación y disminuir la migración de contaminación con la erosión del viento y de lixiviación de contaminantes del suelo a aguas subterráneas. En algunos casos los metales pueden ser transformados a menos biodisponibles y por consiguiente a formas menos tóxicas.

**Fitoimmobilización.-** reducción de la "disponibilidad" de metales en el suelo, mediante adsorción/ absorción, precipitación o quelatación en raíces o rizósfera. Puede contribuir a la disminución de la solubilidad de metales y la re-vegetación de lugares contaminados. El proceso se basa en la habilidad de las raíces y/o microorganismos asociados para impedir el movimiento de contaminantes y su transferencia a la parte aérea de la planta. Los mecanismos suponen la precipitación de contaminantes en formas insolubles en el suelo y acumulación en las vacuolas de las raíces. **(3, 15)**

## 5.2.2 Ventajas y Desventajas de la Fitorremediación

### Ventajas de la Fitorremediación

- ◇ Método terapéutico atractivo, debido a su simplicidad.
- ◇ Gasto financiero y tecnológico, de relativo bajo costo. Tecnología económica.
- ◇ De impacto regenerativo. Tecnología *in situ*, evita ruptura dramática del terreno y preserva el ecosistema. Genera cobertura “verde” estética y ecológica.
- ◇ Su capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal.
- ◇ Puede ser modificada para aumentar su capacidad y selectividad extractiva, por ejemplo, por modificación genética (*Arabodopsis thaliana* en reducción de Hg (II)).
- ◇ Posibilidad de bio-recuperación de ciertos contaminantes, como metales pesados.

Esta nueva técnica de enmienda basada en prácticas agronómicas, consiste en cultivar plantas en un lugar contaminado, después cosecharlas y estas plantas llenas de metales pesados podrían generar una ganancia:

- 1) Como biomasa para generar energía, vendiéndose a compañías de energía eléctrica.
- 2) **Fitominería:** Las cenizas resultantes de la incineración ***también podrían ser llevadas a una fundición para recobrar el metal y nuevamente crear un flujo de ingresos.***

Los beneficios derivados de esta estrategia de fitoenmienda abarcan los sectores del ambiente, la salud, industria y energía. Las pruebas científicas han confirmado la validez de esta estrategia y se han emprendido gestiones para obtener financiamiento para los crecientes esfuerzos puestos en marcha en varios países.

Es importante reconocer que la fitorremediación ofrece ventajas adicionales a la limpieza de suelos y mantos freáticos al emplear alguno de los siguientes mecanismos:

- ◇ Aumento de actividad y población microbiana en subsuelo, aumenta C orgánico.
- ◇ Mejoras en la aeración del suelo por la liberación de oxígeno por las raíces.
- ◇ Retraso del movimiento e interceptación de compuestos orgánicos y algunos metales.
- ◇ Estimulación de transformación de compuestos tóxicos a menor toxicidad.
- ◇ Captación de hidrocarburos volátiles por las hojas, que sirven de “tapadera” a los lugares contaminados.

### Desventajas de la Fitorremediación

La fitorremediación no es un remedio para todos los suelos contaminados, antes de que pueda volverse eficiente en técnica y costo, hay limitaciones a ser superar:

- ◇ Sus mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos poco conocidos. Sus procesos como hiperacumuladoras no sean bien entendidos. Un gran número de plantas hiperacumuladoras todavía están por descubrirse e identificarse.

- ◇ Mínimo conocimiento de la agronomía, genética y de las enfermedades de plantas que acumulan metales, en su gran mayoría, silvestres, pequeñas y de crecimiento lento.
- ◇ Proceso lento porque el índice de acumulación es proporcional al crecimiento de la planta. No hay planta con todas las características y los criterios ideales de una hiperacumuladora eficaz (crecimiento rápido y raíces extensas de biomasa alta, fáciles de cosechar, plantas acumuladoras de una amplia gama de metales tóxicos).

Se hace necesario **introducir sistemas biológicos como la simbiosis entre hongos micorrízicos y las plantas** para coadyuvar en la recuperación de suelos contaminados, o más aún, **modificarlas genéticamente** para mejorarlas y sean empleadas satisfactoriamente como agentes en el proceso de fitorremediación. **(15, 25)**

### 5.2.3 Plantas y depósitos minerales

#### 5.2.3.1 Flora Metalofita

Para describir rocas ígneas (como peridotitas) o metamórficas (como serpentinitas) que presentan un contenido en sílice inferior al 45% (SiO<sub>2</sub>) y tienen altas concentraciones de magnesio y hierro, se utiliza el término **ultramáfico**. Estas rocas con frecuencia presentan, una riqueza relativamente elevada de Cr, Co y Ni, y bajo contenido de P, K y Ca. Las rocas ígneas ultramáficas están formadas por más del 90% de minerales ferromagnesianos, especialmente del grupo del olivino y el piroxeno, y la mayor parte de ellas han sufrido distintos procesos metamórficos. La serpentización es un proceso de alteración hidrotermal que provoca la transformación del olivino en minerales del grupo de la serpentinita. Estas rocas presentan una distribución dispersa, en todo el globo terrestre, de modo que se hallan afloramientos ultrabásicos en ecosistemas como la tundra ártica o selvas tropicales, ocupando alrededor del 1% de la superficie terrestre.

A pesar de la diversidad de estas rocas y que su alteración bajo diferentes climas generan una importante variabilidad edáfica, la elevada concentración de metales pesados, Ni, Cr y Co, los bajos niveles de nutrientes, N, P, K y Ca, y la elevada relación Mg/Ca son rasgos característicos de los suelos derivados de rocas ultrabásicas.

En estas condiciones se desarrolla una comunidad vegetal rica en *taxones* raros y/o endémicos, que desarrollan mecanismos fisiológicos especializados, para resistir, tolerar y prosperar en estos medios tóxicos e infértiles (**Flora serpentinitica** o **metalofita**).

América Latina y Europa son los mayores focos de biodiversidad de metalofitas.

Las metalofitas son plantas tolerantes a metales. La flora ultramáfica de zonas tropicales y subtropicales apenas se ha estudiado. Por la elevada diversidad y abundancia de depósitos de minerales metálicos de estas regiones, existen *enormes posibilidades de descubrir nuevas plantas metalofitas*.

En sitios cercanos a minas y fundiciones es común encontrar extensas áreas contaminadas con diversos elementos ecotóxicos, tales como Cu, Cd, Pb y As. La mayoría de plantas no crece en sitios con altas concentraciones de elementos tóxicos para sus organismos. Sin embargo, el grupo de plantas denominadas **metalofitas**, son capaces de desarrollarse en estas condiciones.

### 5.2.3.2 Clasificación de plantas según su respuesta a elementos ecotóxicos

A) Las plantas metalofitas incluyen a:

- ◇ Metalofitas estrictas, aquellas que solo crecen en sitios contaminados (endémicas)
- ◇ Pseudometalofitas, poblaciones tolerantes de especies comunes
- ◇ **Hiperacumuladoras**, grupo aún más reducido, se definen como metalofitas capaces de concentrar metales.

El *objetivo original de investigar sobre plantas hiperacumuladoras fue **identificar nuevos yacimientos minerales*** y aportar nuevas características **fenotípicas** para la identificación de especies.

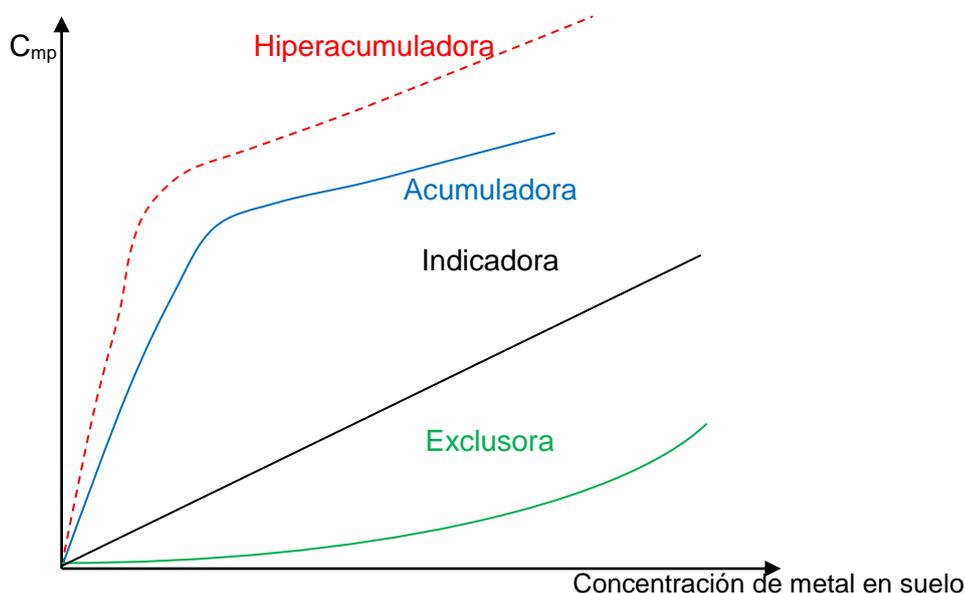
B) Clases de plantas según su estrategia de absorción de elementos

- ◇ Estrategia de **exclusión**.- plantas que toleran elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o translocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes y relativamente bajas en la **biomasa aérea** independientemente de la concentración metálica del suelo en un intervalo amplio.
- ◇ Estrategia de **acumulación**.- especies que absorben los metales activamente a partir del suelo y los acumulan en formas no tóxicas en su biomasa aérea.
- ◇ **Indicadoras**.- respuesta intermedia es la que presentan las plantas indicadoras, cuya concentración metálica refleja la del suelo. **(13, 15)**

Entre las acumuladoras se reconoce diferentes grados de acumulación metálica, desde pequeñas elevaciones sobre el nivel de fondo hasta concentraciones muy elevadas de metales pesados Ni, Zn y Co en su biomasa aérea, sin mostrar ningún síntoma visible de toxicidad.

Algunas de estas plantas, no pueden completar sus ciclos vitales cuando crecen en suelos “normales” y se denominan hiperacumuladoras. (Ver **Figura Nº 5.2**).

**Figura Nº 5.2.- Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo**



$C_{mp}$ : Concentración de metal en planta

Fuente: P.S. Kidd et al., Ecosistemas 16 (2), 26-43, Mayo 2007

## 5.2.4 HIPERACUMULADORAS

### 5.2.4.1 Historia y origen

El botánico **A. Baumann** observó las hojas de ciertas especies de plantas que crecían en suelos enriquecidos naturalmente con cinc y conteniendo altas concentraciones de este elemento, trabajando en los límites entre Bélgica y Alemania. Las especies que particularmente registró fueron la violeta (*Viola aclamaria*) y la mostaza (*Thlaspi calaminare*) recientemente clasificada como *Thlaspi caerulescens*, las cuales contenían cerca de 1 y 1.7% de Zn en el peso seco de las hojas. Los niveles de Zn van de 0.001 a 0.02% del peso seco de hojas de otras plantas.

Dos botánicos italianos, Minguzzi y Vergnano en 1948, descubrieron que el *Alyssum bertolonii* crecía en suelos serpentinos ricos en Ni, en Florencia y que las hojas secas contenían un 1% Ni, de 100 a 1000 veces más que otras plantas cercanas al sitio.

El término "hiperacumuladora" fue acuñado en 1977, por Brooks y Reeves, pioneros en este tema, para referirse a plantas capaces de acumular más de 1.000 mg Ni/kg de materia seca en algún tejido de su biomasa aérea, independientemente de la concentración del metal en el suelo.

De forma general, las hiperacumuladoras alcanzan concentraciones de metales en hojas entre 10 y 100 veces las concentraciones "normales" (Chaney *et al.*, 2000).

Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para designar plantas que acumulan más de 10.000 mg/Kg de Mn y Zn, más de 100 mg/Kg de Cd y más de **1 000 mg/kg** de Co, Cu, Pb, Ni, **As** y Se.

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una variedad de metales del suelo, pero la mayor parte tienden *solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo*. Sólo un pequeño grupo de plantas son una notable excepción a esta regla; las plantas hiperacumuladoras pueden tolerar, absorber, y translocar altos niveles de ciertos metales. La hiperacumulación es un fenómeno raro y la base evolutiva de su selección ha sido una incertidumbre desde su descubrimiento.

La idea de usar plantas para extraer metales de suelos contaminados fue reintroducida y desarrollada por el Dr. Rufus L. Chaney (USA) en 1983 y el primer ensayo en el campo de la fitoextracción fue en 1991. Chaney encabeza los estudios para evaluar estas plantas. En sus investigaciones se encontró la *Thlaspi caerulencens*, que acumula hasta 30000 ppm de Zn y 6000 ppm de Cd en sus hojas, *sin reducir el rendimiento de la planta*. Chaney y sus colaboradores han evaluado la **variabilidad genética** de *A. murale* y *A. corsicum* tras la recolección de semillas de un gran número de individuos.

Con la reproducción de líneas parentales seleccionadas de las dos especies de *Alyssum*, estos autores consiguieron concentraciones de Ni en hoja, de hasta 22.000 mg/Kg y producción de biomasa de hasta 20 Mg/ha en condiciones de campo.

En base a los resultados y datos de precios de mercado del Ni, estimaron un beneficio neto de 1.749 USD / ha para un cultivo anual.

En los cálculos se tuvo en cuenta la variación del precio de Ni en un período de 15 años y los costes derivados de la renta del terreno, el mantenimiento y cosecha del cultivo y la recuperación del Ni a partir de su biomasa. Como resultado de esta investigación se concedió una Patente norteamericana a esta propuesta de “**fitominería**”.

Las primeras plantas hiperacumuladoras caracterizadas, son miembros de las familias *Brassicaceae* y *Fabaceae*. La *Thlaspi caerulescens* y *Viola calaminaria* son especies de plantas documentadas por acumular elevados niveles de metales en sus hojas.

El *helecho Pteris vittata*, originario de Florida, es **capaz de absorber As**. Crece mejor en suelos con elevadas cantidades de arsénico, que en los suelos que carecen de él. **(13)**

#### 5.2.4.2 Función medioambiental

El papel ecológico de las plantas hiperacumuladoras no está aun completamente claro. Algunos estudios recientes sugieren que la acumulación inusual de metales confiere a estas plantas la capacidad de limitar su depredación y las infecciones microbianas causantes de enfermedades vegetales. Es decir, las hiperacumuladoras **suministran protección contra el ataque de hongos patógenos e insectos**. Con esta gran *habilidad las plantas hiperacumuladoras pueden ser usadas como importante recurso biológico en las revegetación y remediación de áreas contaminadas*.

Las hiperacumuladoras han adquirido relevancia en las últimas décadas, debido a su potencial uso en técnicas de **fitoextracción** de metales y metaloides en suelos contaminados. Esta técnica consiste en cultivar especies que acumulan un determinado contaminante por una o varias temporadas. La biomasa aérea es cosechada e incinerada y las cenizas restantes son tratadas como desechos peligrosos. Sin embargo las aplicaciones máximas todavía no se han logrado, porque no se conoce **los mecanismos moleculares y procesos biológicos involucrados**.

En las últimas décadas, se investiga la biología de fitoextracción de metal, sin embargo la **comprensión del mecanismo emerge lentamente. (13, 15)**

El suceso natural de especies de plantas capaces de acumular extraordinariamente altos niveles de concentraciones hace de la investigación un proceso particularmente interesante. Como resultado, se están obteniendo los primeros avances para la comprensión de los mecanismos a nivel molecular por los cuales las plantas son capaces de tolerar los excesos y absorber metales pesados, que serían venenos peligrosos para otras especies, mientras que las hiperacumuladoras los incorporan como nutrientes.

#### 5.2.4.3 Contribución de los HMA en la absorción y translocación de los metales pesados por plantas hiperacumuladoras

Con respecto a la importancia de la micorriza en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, se ha comprobado que esta simbiosis tiene un efecto benéfico, ya que inmoviliza los metales en la raíz reduciendo su translocación a la parte aérea de la planta y en consecuencia, el flujo de metales a la cadena trófica.

Una reciente contribución de los **HMA** en la ecología de los suelos, se relaciona con el descubrimiento de la **glicoproteína** llamada **glomalina**, en 1998. Se ha mostrado que la abundante concentración (comúnmente varios mg/kg) de proteína en el suelo, está altamente correlacionada con los agregados.

Las recientes investigaciones sobre la **glomalina** han contribuido en la recuperación de suelos contaminados por metales pesados.

La glomalina es una glucoproteína que se encuentra en las hifas de los hongos micorrízicos y puede atrapar elementos potencialmente tóxicos.

El **glutathion** es un antioxidante constituido por los aminoácidos **cisteína, glicina y ácido glutámico** que fijan los metales pesados, los ácidos orgánicos forman los complejos con los metales, un proceso de la desintoxicación del metal por lo que la glomalina, el glutathion y los ácidos orgánicos desempeñan un papel dominante en tolerancia del metal por las plantas.

Hay moléculas que facilitan el transporte de los metales pesados al interior de la planta a través de las raíces, por procesos de absorción en las **vacuolas**, que aumentan su biodisponibilidad para las plantas; son conocidas como agentes quelantes.

Como EDTA y DTPA (Ácido Dietilen Triamino Pentaacético), son capaces de formar iones complejos con el metal, facilitando en gran medida la absorción. Estas sustancias pueden ser producidas por la propia planta y liberadas al suelo a través de las raíces.

La absorción de los metales puede ser ayudada por microorganismos como *hongos micorrízicos*.

Maximizar la colonización radicular por HMA en ambientes adversos, como son los suelos contaminados con metales pesados es ahora de gran interés, puesto que una de las limitantes de utilizar plantas para remediar este tipo de suelos es la pobre masa radicular y entre las poblaciones de microorganismos rizósfericos del suelo que contribuyen a aumentarla son los hongos micorrízicos arbusculares. **(6, 13, 25)**

### **5.3 Fitorremediación en suelos de Mayoc contaminados con arsénico**

En todo proceso que genera impactos negativos, hay que diferenciar tres aspectos:

**Prevención** del impacto que se desarrolla antes o durante la explotación.

**Restauración** (*land reclamation*) del terreno, devolverle en lo posible su aspecto original.

**Remediación** (*remediation*), pretende solucionar problemas de mayor calado, no solucionables mediante la simple restauración. **(14)**

La propuesta de control de la dispersión del arsénico en suelos de Mayoc en San Mateo es de remediación y consiste en el Diseño de un proyecto de trabajo a largo plazo, de participación multidisciplinaria cuyo objetivo es reducir o eliminar la contaminación de suelos a través de las técnicas naturales más adecuadas de **fitorremediación**.

El proyecto describe diferentes etapas que abarcan desde la recopilación de datos (Gabinete), las pruebas a nivel de laboratorio y finalmente el trabajo en campo.

### 5.3.1 Trabajo de Gabinete (Procedimiento propuesto)

La remediación de los problemas debe basarse en un conocimiento lo más completo posible del caso, incluyendo el análisis del foco del problema, del proceso que da origen al problema, y los posibles afectados por el mismo, para intentar actuar sobre alguno de ellos de forma que se impida la evolución del proceso, o bien se minimicen sus efectos de una u otra forma. Remediación y restauración a menudo se desarrollan conjuntamente, y en algunos casos, esto puede ser de obligado cumplimiento.

Al tratar de establecer los mecanismos de restauración/remediación a utilizar en un caso concreto, la información a recopilar será variable en función de la naturaleza del problema. La participación de profesionales y técnicos especialistas en las diferentes áreas involucradas confiere un enfoque multidisciplinario necesario a la propuesta de remediación del suelo contaminado, en este caso particular.

#### 5.3.1.1 Descripción de la zona o Hábitat a remediar

El hábitat es el territorio de condiciones ambientales determinadas, habitado por un conjunto de seres vivos para los que tales condiciones son las adecuadas.

El objetivo de la remediación es regresar a las condiciones originales, al territorio impactado por una actividad determinada.

La descripción de la zona a estudiarse debe hacerse al máximo detalle, así como toda la información sobre los temas siguientes, fundamentalmente Suelo y Plantas.

◇ **Ubicación**, coordenadas UTM, plano de ubicación.

DESCRIBIR EN PLANO LAS ZONAS MÁS PROPICIAS PARA EL PROYECTO.

◇ **Tipo de ecorregión**

Ver **Anexo N° 5.2**

◇ **Zona de vida**

Ver **Anexo N° 5.2**

◇ **Geoquímica de la zona**

Características químicas del medio, poniendo especial énfasis en los suelos.

Rocas: la investigación geológica previa generará sin duda abundantes mapas, sin embargo se debe prestar especial atención a la fracturación (fallas redes de diaclasas), con vistas a evaluar las posibles infiltraciones de soluciones.

◇ **Extensión de la contaminación en la zona**

La **prospección geoquímica** se utiliza para detectar yacimientos minerales.

Hoy, además se emplea para determinar el alcance de la contaminación inducida por la actividad minera relacionada con los mismos yacimientos.

Los viejos métodos pueden ayudar en la detección de la contaminación (extensión e intensidad de la misma).

Su principio básico es detectar la dispersión de un determinado metal para ubicar la fuente de emisión o yacimiento mineral. Sirve también para trazar la extensión de un fenómeno de contaminación. La dispersión de elementos químicos lleva a la formación de una zona *geoquímicamente anómala* o *anomalía geoquímica*.

Esta contrasta claramente con lo que se denomina *valores normales* de un determinado elemento químico en el medio de dispersión (suelo, aguas, atmósfera).

El avance físico de la extensión de la contaminación en la zona, se lleva a cabo por análisis de diversas muestras de suelos correspondientes a las áreas distribuidas en círculos concéntricos alrededor del foco emisor contaminante inicial (en este caso específico, el ex - depósito de relaves de Mayoc), a diámetros cada vez mayores. **(14)**

#### **5.3.1.2 Descripción del suelo**

Adecuada caracterización del suelo que permita prever los problemas que puedan derivarse de la infiltración de contaminantes mineros.

No todos los suelos responden de igual manera. En la mayor parte de las explotaciones mineras los suelos han sido severamente compactados, desplazados y mezclados.

La compactación disminuye la percolación del agua de lluvia, incrementa la escorrentía, y dificulta considerablemente las labores de siembra.

Así, durante la fase de restauración será necesario preparar el terreno para su posterior aprovechamiento agrícola.

Esto implica una preparación física (p.ej., arado, rastrillado) y otra químico-biológica o remediación (inocular hongos para favorecer la formación de micorrizas en un suelo muy empobrecido, por ejemplo).

##### ◇ **Caracterización del suelo**

Propiedades físico-químicas y biológicas (Ver **Anexo N° 2.1**)

##### ◇ **Tipo de suelo**

(Ver **Anexo N° 5.3**)

##### ◇ **Capacidad de uso del suelo** (Clase dominante y subdominantes)

(Ver **Anexo N° 5.3**)

##### ◇ **Clase de cobertura del suelo.** Predominancia en la zona de estudio.

(Ver **Anexo N° 5.3**)

### 5.3.1.3 Descripción de la Fauna

Disponer de un catálogo o listado de animales, poniendo especial énfasis en aquellos que reciben una especial protección por estar en peligro de extinción y aquellos que podrían alimentarse de las plantas a utilizar como fitorremediadoras.

### 5.3.1.4 Descripción de plantas, tratamiento del tema equivalente al de la fauna

Disponer de un catálogo florístico (listado de plantas), con énfasis en aquellas plantas que reciben una especial protección por estar en peligro de extinción.

Tanto las compañías mineras como los organismos públicos (locales, regionales o estatales) suelen favorecer el sembrado de gramíneas (pastos) por dos razones principales: 1) porque confieren al sitio un aspecto atractivo; y 2) porque los resultados se consiguen a corto plazo. Sin embargo, las gramíneas generan una seria competencia para que puedan establecerse comunidades arbóreas. Una alternativa más adecuada es el sembrado de trébol u otras leguminosas, plantas que enriquecen el suelo en nitrógeno. Una cuestión importante a considerar es que cada región tiene características ambientales propias, por lo cual no es posible dar "recetas" generales.

En este caso particular se debe considerar que la capacidad de fitoextracción de una planta depende tanto de su conformación genética como de las condiciones ambientales a las que está sometida.

La clasificación e identificación de las especies de plantas debe llevarse a cabo, según diferentes criterios, para lograr la **biomasa adecuada para la fitorremediación**.

#### ◇ **Características botánicas** (Ver Anexo N° 5.4)

- Familia (*nombre científico*), Especie, Nombre común.
- Partes de la planta: raíz, tallo, hojas, inflorescencia, fruto.
- Origen de las Especies (introducidas, nativas, endémicas)
- Según las formas de vida de las plantas, sistema de clasificación botánica de RAUNKIAER (terófitas, criptófitas, etc).
- Condiciones de cultivo
- Frecuencia de producción (semestral, anual, bianual, perenne)
- Variedades

#### ◇ **Requerimientos edafoclimáticos**

- Suelo adecuado para la planta
- Rango de temperatura
- Foto periodo y luz

◇ **Particularidades del cultivo**

- Época de siembra
- Conocimiento de la forma de crecimiento y desarrollo, de germinación a madurez fisiológica o estructuras reproductivas (Fenología).

**5.3.2 Trabajo de prospección: Búsqueda y elección de muestras de suelo y plantas (*Procedimiento propuesto*)**

Existen diferentes escalas a la que se puede llevar a cabo una campaña de prospección biológica, edáfica y/o biogeoquímica:

- 1) de reconocimiento, de carácter orientativo, con mapas 1: 1.000.000 a 1: 500.000.
- 2) preliminar, donde se utilizan mapas 1: 200.000 a 1: 100.000.
- 3) detallada, mapas 1: 50.000 y de mayor detalle.

Los conceptos de *prospección estratégica* y *táctica* se relacionan con los anteriores, siendo la primera de carácter regional (orientativa), y la segunda de tipo local, sobre blancos (*targets*) previamente definidos en el estudio regional.

**5.3.2.1 Suelo**

La toma de muestras y estudio del perfil del suelo permite conocer la evolución del contenido metálico en profundidad, y de esta manera posibilita el seleccionar el horizonte más adecuado. Desde el punto de vista de la geoquímica, el horizonte B (de acumulación) es de gran interés, ya que es ahí donde suelen concentrarse de preferencia los elementos químicos.

Sin embargo, no existen indicaciones rígidas en este sentido, por lo que conviene estudiar en cada caso, cuál de los horizontes concentra de preferencia el elemento que se investiga. La toma de muestras y estudio del perfil del suelo permite conocer la evolución del contenido metálico en profundidad, y de esta manera posibilita el seleccionar el horizonte más adecuado.

En cada sitio elegido se recomienda tomar con barreno de 3 a 5 muestras al azar de 1-1,5 kg de suelo cada una, desde la superficie hasta unos 20 cm de profundidad (Método de muestreo en zig-zag, sugerido por Sieverding, 1991). Las muestras se trasladan al Laboratorio en cartuchos de papel. De cada sitio se toman varias (2-5) submuestras las cuales se mezclan para formar una muestra compuesta de aproximadamente un 1 kg.

Las muestras obtenidas se secan al ambiente bajo sombra, posteriormente se tamizan en malla de 4 mm de apertura y se guardan a 5 C en bolsas de polietileno debidamente selladas y etiquetadas, hasta su análisis físico y químico.

### 5.3.2.2 Plantas

La prospección de plantas, dentro de la diversidad vegetal existente en los mismos sitios que se desea remediar, asegura trabajar con especies adecuadas, es decir, especies totalmente adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas.

Esto permite un correcto desarrollo vegetativo de las plantas, lo que facilita los procesos de remoción y *translocación* de los contaminantes, haciendo el proceso más eficiente.

**Las concentraciones de As menores o iguales a 0,011 mg kg<sup>-1</sup> se consideran como normales en la biomasa aérea de una planta.**

La prospección de las especies debe hacerse en áreas perturbadas con la especie contaminante en concentraciones sobre lo normal, según el procedimiento siguiente:

- ◇ Analizar las condiciones actuales de la **vegetación de la zona. Observar y comprobar si se compone de algunas poblaciones de las especies que existían originalmente.** Si esto ocurriera significaría que dichas especies han desarrollado mecanismos de tolerancia a las actuales condiciones edáficas.
- ◇ Seleccionar dos o más áreas representativas de la zona, para confirmar si tienen **concentraciones de arsénico sobre lo normal.** Las áreas representativas se eligen de acuerdo a su ubicación, por la cercanía a los puntos en donde se ha efectuado las actividades que han generado mayor contaminación.  
Las áreas cuya cobertura vegetal disminuye gradualmente, hasta desaparecer totalmente, son aquellas ubicadas al pie del lugar que es foco de la contaminación.

#### ◇ Muestras de Plantas

Para la prospección de especies, en cada área de muestreo se recolecta la **biomasa aérea** de las especies **herbáceas y arbustivas**, para su posterior identificación. Esta labor debe ser efectuada por biólogos especializados. Se debe anotar obviamente las fechas en que se lleva a cabo estas labores, para el registro estacional correspondiente. **(3, 13, 15)**

Para cada especie seleccionada e IDENTIFICADA, dentro de la diversidad vegetal existente en los mismos sitios que se desea remediar, se escoge 2 individuos ubicados a no más de 3 m de distancia entre ellos. De esta manera se pueden considerar UNA MISMA MUESTRA y representativos de un mismo suelo.

***Todas las muestras escogidas y recogidas se trasladan al laboratorio.***

La Prospección de muestras, primera etapa del trabajo experimental consiste además en:

- ◇ Trabajo de Laboratorio, donde las muestras recogidas se analizan para determinar la Caracterización biológica y química de suelos y plantas, el contenido de As (Nivel inicial) y someter a las especies de plantas a diferentes pruebas de “Absorción” de sales de Arsénico para utilizarlas en la siguiente etapa o descartarlas.
- ◇ Trabajo de Campo (remediación), consiste en la aplicación de los resultados de la etapa de laboratorio en las zonas a tratar, utilizando parcelas de prueba.

### 5.3.3 Trabajo de Laboratorio (Procedimiento propuesto)

#### 5.3.3.1 Suelos

A) Caracterización del suelo (Ver **Anexo N° 2.1**)

Parámetros físicos.- desde el punto de vista ambiental los más importantes son la composición mineralógica, la granulometría, la densidad y la porosidad. En determinados casos pueden considerarse el volumen, la consistencia, el color y la temperatura.

Parámetros físico-químicos.- basados en determinaciones físicas sobre propiedades con implicaciones químicas. Los más importantes son los relacionados con la reactividad del suelo: pH, E, Intercambio iónico,

Análisis químico.- puede incluir gran variedad de parámetros analizados mediante técnicas muy variadas, clásicas e instrumentales. Los tipos de análisis químicos más frecuentes son: Materia orgánica (MO), Análisis geoquímico total, Análisis de agua, Conductividad eléctrica. Otros análisis pueden ser tan variados como las necesidades específicas de cada estudio. Puede ser necesario detectar contaminantes orgánicos específicos en el suelo, para lo que se emplearán técnicas instrumentales como cromatografía.

B) Análisis de arsénico en suelos

1. Extracción **de As**: Pre-tratamiento de muestras de suelos (Ver **Anexo N° 5.5**)

Las muestras de suelo se someten a procedimientos que liberan el arsénico de su matriz y aseguran que el análisis del contaminante sea representativo de la cantidad del mismo. El arsénico puede ser extraído del suelo por diferentes procedimientos de digestión ácida. **(21)**

2. Análisis químico de arsénico en las muestras de suelo

Después que el arsénico total ha sido extraído de la muestra de suelo (indicado en acápite anterior (B) 1), se analiza por el método disponible o adecuado. **(1)**

Los métodos analíticos para determinar arsénico son:

- ◇ Espectroscopia visible (As total: 1-100 µg) (Dietilditiocarbamato de plata)
- ◇ Espectroscopia de absorción atómica con generación de hidruros (H-AAS)
- ◇ Espectrofotometría de absorción atómica con cámara de grafito (ET-AAS)
- ◇ Espectrometría de emisión atómica con plasma generado por inducción (ICP)
- ◇ Espectrometría de emisión atómica con plasma generado por inducción acoplada con generación de hidruros (ICP-AES)
- ◇ Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)
- ◇ Fluorescencia atómica y de rayos X
- ◇ Activación neutrónica
- ◇ Métodos electrométricos
- ◇ Volumetría

Para el aseguramiento y control de calidad de los resultados, se recomienda analizar muestras de referencia. Ejm.- Sedimentos del International Atomic Energy Agency, GBW 07312 (sedimento de río) y IAEA-SL-1 (sedimento lacustre).

### 5.3.3.2 Plantas

#### Determinación de arsénico en plantas de prueba

Se trabaja con **plantas jóvenes similares** a las representativas de la flora aledaña a la zona en estudio. La(s) muestra(s) seleccionada(s) para esta etapa del trabajo, escogidas por su cercanía (2 o más individuos de la misma especie, ubicados a no más de 3 metros de distancia entre ellos), se pueden considerar como **una misma muestra** y representativas de un mismo suelo.

#### A) Absorción de arsénico (Pruebas de **Rizofiltración**)

En la presente experiencia de absorción de una solución acuosa de arsénico de concentración conocida, se trabaja con dos especies completas, incluida la raíz, de planta de la misma muestra, para una mejor evaluación del contenido de arsénico.

- 1º Las plantas seleccionadas se lavan dos veces con agua potable para remover partículas de suelo y posteriormente dos veces con agua destilada.
- 2º Se colocan en un recipiente que contiene una solución acuosa de **20 mg As/L**, As (III o V) (arseniato ácido disódico o arsenito ácido disódico), durante 20 días.
- 3º Después de esta etapa, las hojas frescas se secan en estufa a 60 - 80°C durante 48 horas. Las hojas secas se procesan en un **molino**, se pasan por tamiz malla 20 y se guardan en frasco de vidrio. Para evitar la contaminación cruzada de las muestras, el molino se limpia con aire comprimido entre una muestra y otra. Antes de iniciar las técnicas de extracción, el material **se seca nuevamente a 80°C durante 2 horas**.

B) Plantas de prueba BLANCOS o TESTIGOS (*Nivel base de arsénico o nivel CERO*)

De las muestras de cada planta seleccionada, consideradas una misma muestra, se separa ejemplares a los que no se somete a la absorción de la solución de As, por rizofiltración ni riego en maceta.

El contenido de As en estas plantas se considera el nivel CERO o el más bajo. Las plantas son BLANCOS o TESTIGOS. El análisis de As en las muestras Blanco, incluye procesos de extracción y análisis, como se detalla en D y E.

C) Absorción de arsénico en plantas cultivadas en maceta

A la planta seleccionada se añade concentraciones conocidas de solución de As en reemplazo del riego con agua, por un tiempo determinado y a una frecuencia establecida o hasta observar deterioro en la planta (fitotoxicidad).

En la parte experimental se determina la frecuencia de regadío apropiada para cada especie de planta. Este procedimiento simula el proceso de fitorremediación en la primera etapa de Laboratorio, representa en forma más realista el sistema suelo-planta involucrado.

D) Extracción de arsénico

Después de los tiempos de duración de las experiencias previas de rizofiltración y absorción en maceta, al material vegetal que ha absorbido la solución de As, se le extrae el contaminante, para aislarlo de elementos interferentes, mediante un procedimiento llevado a cabo para evitar pérdidas del analito o contaminación.

Esta etapa extractiva es previa al análisis de As en las muestras vegetales y posterior al procedimiento de secado y pulverizado de muestras, indicado en (A).

Para la extracción de As puede utilizarse varios métodos

- ◇ Digestión con ácidos o bases minerales fuertes, varios (más frecuentes)
- ◇ Mineralización por calcinación en mufla (reducción a cenizas)
- ◇ Extracción con disolventes orgánicos (cloroformo o metanol, procedimiento largo y trabajoso). A pesar de que la extracción con metanol y agua ha dado muy buenos resultados en plantas, es de difícil aplicación en el análisis de rutina en el laboratorio.
- ◇ Extracción con Enzimas (**Anexo N° 5.5**) (21)

E) Análisis de arsénico

El procedimiento analítico puede seleccionarse entre diferentes técnicas, de la misma manera como se indica en el análisis de arsénico en suelos.

Es recomendable comprobar exactitud y precisión del método, analizando patrones de referencia. Ejm.- Plantas del *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

#### F) Análisis estadístico de los datos

La relación entre los resultados obtenidos y diferentes parámetros (pH del suelo, estación, cercanía al foco de contaminación, tipo de planta, etc.) se analiza por regresión múltiple ( $P < 0,05$ ) con softwares apropiados. Ejm.- Software MINITAB 13.1 para Windows.

#### **5.3.4 Trabajo de campo - Pruebas de remediación (Procedimiento propuesto)**

Si el suelo cede As que la planta absorbe, se da la respuesta esperada en el sistema suelo-planta y por tanto, los resultados de la etapa de pruebas en el laboratorio son positivos, aunque no son únicos ni definitivos. El trabajo de campo o las pruebas de remediación del suelo contaminado empieza con la aplicación de los primeros resultados a nivel de laboratorio, en parte de la zona afectada. La búsqueda de la técnica de fitorremediación más adecuada requiere de tiempo, experimentando en macetas o en parcelas en el mismo campo.

##### **5.3.4.1 Clasificación de los suelos, en zonas de mayor a menor grado de contaminación**

Se debe establecer diferentes zonas de experimentación, cubriendo distintos tipos de suelos y grado de contaminación. La clasificación del grado de contaminación de los suelos en base a los niveles máximos de concentración de los principales contaminantes: **As**, Hg, Pb, Cd, Cu y Zn, según los criterios de diferentes organismos. Como las legislaciones nacionales e internacionales, Sector Energía y Minas, Sector Salud, Sector Ambiental, Gobiernos locales.

Considerando la sensibilidad y destino de cada zona se establece una razón:

***zonas menos sensibles / zonas sensibles*** (para uso de los ciudadanos)

Los suelos con concentraciones superiores a los rangos máximos considerados requieren intervención. *Los niveles de As ( $\mu\text{g/g}$  o  $\text{mg/k}$ ) en suelos que requieren intervención, establece una razón de **100 / 52** (Menos sensibles/sensibles), según el criterio de la Junta de Andalucía (Caso de contaminación de Aznalcóllar, 1998). Esta información podría ser el **punto de partida del INVENTARIO NACIONAL DE SUELOS CONTAMINADOS.***

##### **5.3.4.2 Estudio de suelos en parcelas y/o macetas**

Clasificación de los suelos en parcelas de 1.000 m<sup>2</sup> o menos, según el área total del suelo afectado. Utilizando las ***parcelas de experimentación*** se desarrolla el proyecto de fitorremediación de un tiempo determinado de duración, basado en el uso de plantas para recuperar la zona y/o enmiendas orgánicas. Primero limpiar, homogeneizar y descompactar el terreno y facilitar la siembra.

Si la parcela experimental de 1.000 m<sup>2</sup> muestra una gran heterogeneidad en sus condiciones físico-químicas, se divide en subparcelas de menor área. En estas se siembra de manera uniforme, en las subparcelas centrales, con una densidad de siembra aproximada de 20 g de semilla/m<sup>2</sup>. Se cultiva sin aplicar enmiendas y bajo las condiciones climáticas locales. Hacer varios muestreos de suelo (20 cm superiores) y de planta en el ciclo de cultivo.

Pruebas en macetas.- Para experimento final, se elige suelo que presenta mayor contenido de elementos contaminantes. El suelo se coloca en macetas de 350 g (puede ser con arena en diversas proporciones) y se siembra con las semillas escogidas. Las macetas se colocan en bolsas “sunbags” de acuerdo con la técnica de Walker (2001, Ver **Foto Nº 5.1**)) y se mantienen en condiciones semicontroladas, a temperaturas adecuadas día y noche, con una humedad relativa (H.R.) del rango de la zona.



**Fotografía Nº 5.1.-** Cultivo en macetas

#### **5.3.4.3 Enmiendas del suelo (calizas, orgánicas)**

Antes de estudiar y establecer una estrategia de fitorremediación en los suelos afectados, se deben estudiar las condiciones específicas de los mismos, como son:

- ◇ Acidez del suelo con distribución heterogénea.
- ◇ Altas concentraciones de arsénico y otros varios metales.
- ◇ Variabilidad espacial de la solubilidad y toxicidad de los metales.
- ◇ Pobre fertilidad física, química y biológica, por eliminación de capa superficial fértil.

Esto permite empezar por **acondicionar el suelo** para permitir el crecimiento vegetal, bien por introducción de vegetación o por desarrollo de una vegetación espontánea.

Los parámetros 1, 2 y 3 se determinan en la etapa de laboratorio. Los valores de **pH del suelo** inferiores a 5 resultan inadecuados para el desarrollo vegetal. Si los suelos presentan pH menores, se debe añadir **enmiendas calizas** que neutralicen acidez.

Si se da el caso de eliminación de la capa superficial del suelo, suelos desnudos y con escasa fertilidad (contenido medio de carbono orgánico de suelos menor del 1%), se precisa el aporte de **enmiendas orgánicas** como estiércol y compost.

### **Enmiendas del suelo:** Efectos de la **adición de cal, compost y estiércol**

Al estudiar el efecto de la adición de cal, compost y estiércol se debe analizar cuál de ellos es capaz de mantener el pH en valores más elevados, debido a la existencia de nuevas condiciones de oxido-reducción en el suelo.

La adición de una enmienda caliza permite aumentar los valores de pH hasta alcanzar un intervalo óptimo para el crecimiento de las plantas, como también contrarrestar la acidificación de los suelos, *si hubiera oxidación de pirita*.

Las **enmiendas orgánicas** se utilizan tradicionalmente para mejorar la fertilidad de suelos agrícolas, ya que la materia orgánica mejora propiedades físicas de los suelos como son la capacidad de retención hídrica, la capacidad de infiltración de agua, la porosidad y la aireación del suelo, promoviendo la formación de agregados estables. Estas enmiendas también son fuente de nutrientes esenciales para las plantas, y favorecen la actividad y desarrollo de los microorganismos del suelo, mejorando su fertilidad química y biológica.

Estas propiedades de la materia orgánica son todavía más importantes en la recuperación de los suelos contaminados, ya que, con frecuencia, estos suelos muestran una escasa fertilidad, estructura deficiente y limitada actividad biológica.

Aunque no tienen tanta capacidad de neutralización de la acidez, poseen una alta capacidad tampón gracias a su elevado contenido de materia orgánica, favoreciendo el mantenimiento del pH del suelo de forma más prolongada.

El estiércol aporta una materia orgánica lábil, fácilmente degradable por los microorganismos del suelo como fuente de energía, que hace que las condiciones redox del suelo sean menos oxidantes, atenuando el proceso de oxidación de los sulfuros (si los hubiera) y por tanto, de acidificación. Además, la alta riqueza en fósforo del estiércol, lleva a la formación *de fosfatos muy insolubles con Plomo*.

La biomasa microbiana se considera un indicador de fertilidad y salud de un suelo, y es extremadamente sensible a la presencia de contaminantes. Por lo que puede ser un índice válido para medir el grado de recuperación del suelo.

Este beneficio asociado a las enmiendas orgánicas se debe a la mejora de la actividad biológica del suelo. Si un suelo no muestra valores apreciables de biomasa microbiana, indica la muerte de los microorganismos.

Respecto a la aplicación de enmiendas orgánicas, se debe evaluar el mejoramiento de la producción de planta con estiércol y compost. El compost cumple el papel de fertilizante de acción lenta y mejorador de las propiedades físicas del suelo.

Evaluar si en la siguiente cosecha el tratamiento con compost es más productivo (kg / ha) que el **control (subparcela no cultivada)**. En las subparcelas no cultivadas y cultivadas se debe observar los cambios en el pH al final del proceso. Si la planta en estudio presenta una *alta tasa de liberación de citrato al medio, por las raíces*, a modo de tampón en el suelo, esto puede generar la *atenuación de la acidez del suelo próximo a la raíz*.

Igualmente, las precipitaciones y diversos agentes externos influyen notablemente en la acidez del suelo, aumentando el ritmo de liberación de los contaminantes.

En cambio, la presencia de una **cubierta vegetal** ejerce un efecto amortiguador de estos agentes externos sobre la degradación del suelo. La presencia de semillas en el estiércol es uno de los problemas que su uso puede ocasionar a la hora de un correcto desarrollo del cultivo planeado. En todo caso, las enmiendas orgánicas mejoran el crecimiento de las plantas en los cultivos realizados. En las parcelas con un pH aceptable para el crecimiento de las plantas (>4.5) el estiércol de vaca permite la mayor producción de biomasa, probablemente como consecuencia del aporte de nutrientes (principalmente N y P), y de la reducción de las concentraciones de metales biodisponibles. Para la mayoría de las especies vegetales el pH óptimo del suelo es 6-7, en parte porque en este rango de valores la disponibilidad de nutrientes es máxima. En este intervalo de pH, la solubilidad de los metales pesados es baja, favoreciendo el crecimiento vegetal. **(3, 15, 18)**. La excepción es el As, un metaloide, cuya solubilidad es más baja a pH bajo (< 6). En **suelos contaminados por metales y As, un pH alrededor de 6,0 puede ser idóneo**.

#### **5.3.4.4 Variación estacional de la concentración de arsénico**

Esta etapa del proyecto requiere realizar las pruebas en las diferentes etapas vegetativas (por estaciones). Corresponde al estudio de la variación por estaciones de la concentración de arsénico en la biomasa aérea de las especies, cada colecta se hace en el mismo lugar o sector.

Primer muestreo: temporada en estado vegetativo.

Segundo muestreo: temporada en estado reproductivo.

Tercer muestreo: temporada de especies en estado de senescencia.

Para las plantas colectadas en segundo y tercer muestreo, la biomasa aérea se separa en **hojas de otoño** (en la parte baja del tallo), **hojas de verano** (en la parte alta del tallo), **tallo, flores y frutos**, siguiéndose el mismo procedimiento para el análisis del elemento, en todas las muestras.

#### 5.3.4.5 Resistencia de la especie seleccionada a diferentes situaciones de estrés

Las propiedades más destacables de la especie seleccionada relacionadas con su alta resistencia a:

- a) bajas temperaturas (indicar mínima temperatura tolerable, de acuerdo a sus características fisiológicas. Crecimiento óptimo (indicar rango de temperaturas diurnas).
- b) capacidad de desarrollarse en suelos según los rangos de pH.
- c) Capacidad de resistencia a la sequía (siendo las etapas más críticas, el período de floración y de crecimiento de la vaina).
- d) Criterios de fitotoxicidad cuando el pH se sitúa en diferentes rangos, indicar los metales que generan toxicidad en la planta y los valores pico de pH cuando alcanza un valor letal. Por debajo de 4,5, por ejemplo, habitual en zonas afectadas por residuos mineros.

Se debe considerar adicionalmente las características biológicas de la planta *relacionadas a su adaptación* como:

- Tipo de raíces
- Capacidad de fijar nitrógeno atmosférico
- Capacidad adaptativa para crecer en suelos degradados y pobres en nutrientes, típicos de zonas contaminadas. (13, 15)

#### 5.3.4.6 Estrategias de fitorremediación (Claves para la elección de la mejor estrategia)

- 1) Es fundamental el conocimiento de la **distribución de As a lo largo del desarrollo de la planta**, que debe ayudar a realizar estudios más detallados para entender la dinámica de la **absorción, acumulación y retranslocación** del metaloide en las distintas estructuras de la planta. La biomasa correspondiente a la parte aérea (incluyendo vainas) debe experimentar un gran incremento en la época óptima de cultivo. Después se seca la planta y acaba su ciclo con la caída de los restos vegetales al suelo. Este patrón de crecimiento condiciona notablemente las concentraciones y las exportaciones a lo largo del ciclo de cultivo.

De este modo, durante la **etapa de máxima producción de biomasa** se facilita un descenso de las concentraciones en planta (efecto dilución). El conocimiento de esta dinámica beneficiaría directamente la eficiencia de un proceso de fitoextracción, ya que se podría determinar la etapa exacta del desarrollo en que la planta **concentra la mayor cantidad de arsénico en su biomasa aérea**.

Por tanto, el momento ideal para su cosecha, ya que permite **extraer la máxima cantidad de elemento contaminante, evitando su retorno al suelo.**

- 2) La producción de biomasa y la capacidad real de acumulación de As, evitando la contaminación externa de los tejidos. En función a esto, la relación entre las concentraciones de As en biomasa aérea y en el suelo. Estos datos contribuirán a decidir si se realiza el proceso de fitoextracción a gran escala, donde es preferible utilizar plantas que **no requieran manejos agronómicos.**

El cultivo de la especie elegida (en los meses óptimos) debe mostrar una tendencia a reducir los niveles disponibles de contaminantes en suelo, con respecto a los del momento de la siembra.

En la mayoría de los casos, esta reducción es significativa en la época de máxima producción de biomasa. Es decir, al igual que con la acidez, las concentraciones de los contaminantes disminuyen gracias a la presencia del cultivo, tanto por la propia absorción de las plantas como por su interacción con los componentes del suelo.

*En los ensayos de campo se determina **cuál o cuales de las formas de fitorremediación es la más adecuada para el proceso de recuperación del suelo.***

El mejor efecto de extracción se evalúa a través de **la mayor producción de las especies**, asociada a una mayor **extracción de contaminantes y al tipo de enmienda aplicada.**

Teniendo en cuenta la cantidad de metal presente en los 20 cm superficiales del suelo, y los límites establecidos por la legislación ambiental más adecuada, para suelos agrícolas (a establecerse, como parte del mismo proyecto), se calcula el exceso de metales que sería necesario extraer.

De acuerdo con esta estimación se obtiene el número de cultivos requeridos para disminuir las concentraciones existentes, hasta quedar por debajo de los valores máximos.

- 4) Después de evaluar las especies tolerantes a metales pesados y METALOIDES y las estrategias de fitorremediación a utilizarse, se puede permitir una segunda fase de "Atenuación Natural", es decir, dejar a los suelos evolucionar sin intervención alguna, permitiendo el desarrollo de vegetación espontánea.

En la segunda fase de atenuación natural, la presencia de As, además de Cu, Zn, Mn, Cd, puede disminuir en todos los tratamientos, gracias a la fijación sobre óxidos amorfos de Fe y Mn recientemente formados.

Después de la fitorremediación activa y la etapa de atenuación natural, la biomasa microbiana puede alcanzar valores similares a los de suelos no contaminados.

- 5) Finalmente según los resultados en la concentración de As se determina la clasificación de especies, según la concentración de As en sus *biomasas aéreas*, en rangos hallados en el mismo trabajo de experimentación, desde Baja acumulación a Media acumulación, llegando a Alta acumulación.

Todo este proceso involucra el llegar a identificar especies vegetales capaces de acumular arsénico en cantidades por encima de los valores considerados normales y quizás, hasta encontrar una o más especies de plantas hiperacumuladoras de As.

#### 5.3.4.7 Técnicas de mejoramiento de plantas hiperacumuladoras

En el caso que el proyecto en su etapa experimental llegara a determinar una especie de planta hiperacumuladora de arsénico, se puede aplicar las técnicas descritas a continuación, basadas en un trabajo realizado para extraer níquel.

- (1) Cultivo y reproducción de especies hiperacumuladoras seleccionadas (selección y/o reproducción de cultivos seleccionados)

La capacidad de acumular metales de las especies hiperacumuladoras presenta una **gran variabilidad natural** entre poblaciones y dentro de la misma población. Esta diversidad genética se puede explotar a través de la reproducción tradicional de plantas para conseguir hiperacumuladoras mejoradas que presenten una mayor productividad y capacidad de acumulación metálica.

Esto permitiría extraer anualmente una mayor cantidad de metales (eficiencia de la fitoextracción) que las plantas silvestres.

- (2) Manipulación de las condiciones de la rizósfera

Aunque las plantas hiperacumuladoras tienen una extraordinaria capacidad para absorber metales pesados, esta capacidad depende de la biodisponibilidad de los metales en el suelo y, particularmente, del suministro a partir de formas menos disponibles para la planta. Los **metales** aparecen **en el suelo unidos a fracciones con distinto grado de labilidad: cambiables, ligados a materia orgánica, a óxidos de hierro y manganeso, y a estructuras minerales.**

El equilibrio dinámico que se establece entre estas fracciones, más que el contenido total de metales, determina la movilidad y biodisponibilidad, siendo el pH, el potencial redox, y la cantidad y tipos de materia orgánica y arcillas los factores edáficos más importantes en su control.

*En diversos estudios se ha relacionado el almacenamiento y translocación de metales en las plantas hiperacumuladoras, con la presencia de ácidos carboxílicos de bajo peso molecular (como malato, oxalato, citrato) y complejos aminoácido-metal.*

Además, las condiciones de la interfase raíz-suelo (rizósfera) pueden ser modificadas por la planta, a través de producción de **exudados radiculares** y rizo-depósitos (mucílago y restos celulares) y por la actividad microbiana como la liberación de *sideróforos* o reacciones redox. Esto sigue siendo motivo de estudio y debate ya que los resultados publicados a veces son contradictorios.

- (3) Desarrollo de plantas de crecimiento rápido y alta biomasa, con capacidad de absorción mejorada, a través de la ingeniería genética.

Esta última medida podría conseguirse a través de la identificación y clonación de los genes responsables de la hiperacumulación de los metales pesados y su transferencia a plantas de cultivo de elevada productividad. Los genes responsables de la hiperacumulación de los metales en los tejidos finos de la planta se han identificado y se han reproducido. Hasta la fecha, la aplicación más exitosa de la ingeniería genética ha sido la transformación de plantas con el gen bacteriano *merA* modificado para detoxificar Hg (II) en el 2003. Sin embargo, las **objeciones ecológicas, sociales y legales** a estos procedimientos son numerosas.

Hasta la actualidad, se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras, distribuidas entre 45 familias, lo que representa sólo un 0,2% de las angiospermas. No obstante, la lista sigue creciendo con citas recientes, como la del helecho *Pteris vittata*, que hiperacumula arsénico, en el 2001, o la de *Alyssum bracteatum*, hiperacumuladora de níquel en el 2007.

El gran interés despertado por las plantas METALOFITAS, especialmente hiperacumuladoras, para detoxificar un ambiente contaminado, obliga también a resolver problemas relativos a otras disciplinas. Cuando se **potencie la investigación conjunta de diversos campos** como **botánica, fisiología vegetal, agronomía, química y genética**, probablemente se inicie un brillante futuro para la fitorremediación.

El entorno de las plantas hiperacumuladoras revela la necesidad de impulsar mayores conocimientos multidisciplinarios que aumenten la rentabilidad y eficacia de dichas plantas: sus aplicaciones son interesantes en muchas áreas, y particularmente importantes en la protección del ambiente.

Finalmente, con la información científica necesaria obtenida en base a la participación de diversas instituciones como universidades y centros de investigación se puede formular un programa de investigación que permita desarrollar un proyecto de recuperación de diferentes zonas afectadas y la salud de sus habitantes. **(3, 13, 15)**

***Esta propuesta puede extenderse a otros contaminantes y adaptarla a otros sitios contaminados por diversas actividades mineras, agrícolas o de otra índole.***

### 5.3.5 Trabajo experimental

#### 5.3.5.1 Trabajo de Gabinete sobre situación en *Mayoc*

##### Descripción de la zona de Mayoc

###### ◇ **Ubicación**

Las coordenadas UTM promedio de ubicación de la zona donde estaba la relavera son **8 699 045 N; 357 958 E**. Con altitud promedio de 2 940 msnm. Las coordenadas geográficas de la misma zona están entre: 11°45'-11°47' de latitud y 76°18'-76°20' de longitud en la zona 18.

Plano de ubicación (Ver Cap. I).

###### ◇ **Tipo de ecorregión**

Se define una **ecorregión (región ecológica)** o **biorregión**, como un área geográfica relativamente grande que se distingue por el carácter único de su morfología, geología, clima, suelos, hidrología, flora y fauna.

Tipo de Ecorregión de la zona de Mayoc y alrededores: “**Serranía esteparia**”.

La **serranía esteparia** está ubicada entre los 1.000 y 3.800 msnm, desde La Libertad hasta el norte de Chile.

Se distinguen dos tipos de climas: uno templado y sub-húmedo con temperaturas altas y precipitaciones bajas entre los 1.000 y 3.000 y otro con temperatura media, con veranos lluviosos e inviernos secos, entre los 3.000 y 3.800 (Brack E. Antonio, 1987).

###### ◇ **Zona de vida**

**Estepa-Montano Tropical (e-MT)** según Mapa Ecológico del Perú – Guía Explicativa (INRENA, 1995).

Geográficamente esta zona de vida se distribuye a lo largo del flanco occidental andino, en forma casi paralela y sobre la zona de vida Estepa-Montano Bajo Tropical (e-MBT) y en menor cuantía envolviendo ciertos valles interandinos: Callejón de Huaylas, Tarma, Acobamba hacia Sihuas.

Altitudinalmente se ubican en las zonas mesoandinas, entre 2 800 y 3 800 m.s.n.m. Entre las localidades importantes que corresponden a estas zonas de vida se encuentran Corongo, Aija, **San Mateo**, Puquio, Coracora y Chivay.

### Descripción del suelo

#### ◇ **Tipo de suelo**

Los suelos de Mayoc son moderadamente profundos en el área del proyecto y alrededores y pertenecen principalmente a las asociaciones de grandes grupos de suelos de tipo **litosol andino** y **andosol vítrico** con inclusiones de **xerosol háplico, monticulado**.

El relieve topográfico es predominantemente empinado con escasas áreas de topografía un tanto más suave. Los litosoles (incluye formaciones líticas) dominan las superficies muy empinadas y de escasa cubierta edáfica. (INVENTARIO y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES, ONERN, Perú 1975).

#### ◇ **Capacidad de uso del suelo** (Clase dominante y subdominantes)

La capacidad de uso de los suelos en el área de Mayoc y los alrededores, varía de buena a pobre, debido a que la topografía agreste sólo permite el desarrollo de actividades agrícolas en los lugares de pendiente suave o en áreas vecinas a los ríos. La **Clase dominante** de capacidad de Uso es la **Clase VIII**, que corresponde a tierras no apropiadas para fines agropecuarios ni forestales.

**Subdominantes: Clase VI** que corresponde a tierras apropiadas para cultivos permanentes, pastoreo y forestales; **Clase VII** corresponde a tierras regulares o marginales, aparentes sólo para pastoreo extensivo y forestales, no arables. Según el libro "Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales" (ONERN, Perú 1975).

### Descripción de las plantas

#### ◇ **Tipos de plantas**

La vegetación natural en la zona de vida estepa-montano tropical está dominada por la familia de las gramíneas, entre las que destacan los géneros Poa, Stipa, Festuca, Calamagrostis y Eragrostis.

En los límites más cálidos de la zona de vida se observa arbustos de constitución leñosa. En la franja de subtropical es característica la presencia de extensas áreas cubiertas por la "tola" o "taya". La formación vegetal dominante en los alrededores del depósito de Mayoc es el **matorral alto**. La flora además está compuesta por las especies indicadas en la **Tabla N° 5.1**.

#### ◇ **Clasificación botánica: Familia, Especie, Nombre común**

En la Tabla N° 5.1 se indican estos datos para la flora característica de Mayoc.

Tabla N° 5.1.- Flora aledaña al depósito de relaves Mayoc

<b>Familia</b>	<b>Especie</b>	<b>Nombre común</b>
<b>Asteraceae</b>	<b><i>Ageratina Azangaroensis</i></b>	Warmi Warmi
	<b><i>Ambrosia Arborescens</i></b>	Altamisa, Marco
	<b><i>Baccharis Latifolia</i></b>	Chilca
	<b><i>Lepidophyllum quadrangulare</i></b>	<b>Tola, Taya</b>
	<b><i>Bidens Andicola</i></b>	Amor Seco
	<b><i>Taraxacum Officinale</i></b>	<b>Diente de León</b>
	<b><i>Tajetes Sp.</i></b>	<b>Chincho</b>
	<b><i>Senecio Spp.</i></b>	
<b>Amaranthaceae</b>	<b><i>Amaranthus Caudatus</i></b>	
<b>Brassicaceae</b>	<b><i>Brassica Sp.</i></b>	Jitga o Nabo Silvestre
<b>Chenopodiaceae</b>	<b><i>Chenopodium Murale</i></b>	Flor de Gallinazo
<b>Fabaceae</b>	<b><i>Spartium Junceum</i></b>	<b>Retama</b>
<b>Myrtaceae</b>	<b><i>Eucaliptus Globulus</i></b>	<b>Eucalipto</b>
<b>Solanaceae</b>	<b><i>Lycopersicon Chilensis</i></b>	
	<b><i>Solanum Nitidum</i></b>	
<b>Scrophulariaceae</b>	<b><i>Calceolaria Sp.</i></b>	Zapatito del Diablo
<b>Papilionoideae</b>	<b><i>Trifolium Incarnatum</i></b>	Trébol
<b>Plantaginaceae</b>	<b><i>Plantago Sp.</i></b>	<b>Llantén</b>
<b>Poaceae</b>	<b><i>Calamagristis Sp.</i></b>	Ichu
	<b><i>Festuca Sp.</i></b>	Ichu
	<b><i>Stipa Ichu</i></b>	Ichu
	<b><i>Pennisetum Clandestinum</i></b>	Kikuyo
<b>Umbelifera</b>	<b><i>Conium Maculatum</i></b>	Cicuta
<b>Verbenaceae</b>	<b><i>Verbena Officinalis</i></b>	<b>Verbena</b>

Fuente: Plan de Cierre del depósito de Relaves de Mayoc, SVS Ingenieros S.A. Abril, 2005.

### 5.3.5.2 Trabajo de Laboratorio

#### ◇ Selección de las plantas representativas de Mayoc

Para el trabajo experimental de fitorremediación, la selección de **plantas representativas de la zona de Mayoc**, se hizo con un criterio práctico, por las siguientes razones:

- Para ingresar a la zona de Mayoc con suelos contaminados se requiere permiso especial, debido a que fue cerrada por los problemas que generaron los reclamos de la población.
- La zona no se encuentra muy cerca de Lima, y ante la necesidad de requerir muestras de plantas para repetir las pruebas experimentales por alguna razón determinada (deterioro de la planta durante el transporte, deterioro en regado con soluciones de arsénico, errores involuntarios, etc.) es preferible contar con la cercanía del mercado de plantas.
- Llevar a cabo el **objetivo experimental**: determinar la **capacidad de sorción de compuestos de arsénico de algunas plantas** que se dieran en la región de **Mayoc (Flora aleña al ex depósito de relaves)**.

Por lo que se escogen las plantas disponibles (de algunas de las especies más conocidas, incluidas en el listado de la Tabla N° 5.1) y se decide la compra de las mismas en los mercados de Lima, para evitar el tramitar permisos y los viajes largos a la zona en el caso de volver a requerir alguna(s) muestra(s).

#### (A) PRIMERA ETAPA - JULIO 2008

##### DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS ESCOGIDAS

**Todas las plantas se adquieren en maceta**

##### Eucalipto

Árbol siempre verde que puede alcanzar hasta 60 m de altura, con la corteza blanquecina que se desprende en tiras en los ejemplares adultos. Copa piramidal, alta. Tallos jóvenes tetragonos, blanquecino-pubescentes. Tiene hojas altamente aromáticas de color verde azul, en forma de corazón cuando son jóvenes y largas y lanceoladas en su madurez. Existen más de 200 variedades.

Debido a que su enorme sistema de raíces absorbe vastas cantidades de agua, se ha plantado en áreas pantanosas infestadas de malaria para secar el suelo y purificar el aire.

La reforestación con eucalipto en el área de Mayoc no es recomendable, ya que exige mayor cantidad de agua y debido a la escasez de lluvia de la zona de vida Estepa Montano (máximo de 500 mm) esta propuesta no puede ser posible.

### **Retama**

Arbusto de 2 a 4 metros, erguido, de ramificación abundante color verde oscuro, con pocas hojas muy pequeñas y flores grandes de color amarillo dorado, vistosas, muy perfumadas, dispuestas en racimos terminales.

Se adapta a distintos tipos de suelos, arcillosos, calcáreos, salinos, arenosos y pobres con un buen drenaje. Precisa riego moderado. Es una especie muy rústica por lo cual es utilizada en lugares con pendientes, para consolidar taludes y bordes de rutas.

### **Llantén**

De la especie *Plantago major* es conocida por diferentes nombres, Llantén mayor o Llantai. No hay clara diferenciación entre los llamados llantén macho y hembra.

Hierba perenne de hasta 40 cm de alto, con hojas arrosetadas, simples, anchas, ovals o ligeramente lanceoladas e irregularmente dentadas en su base.

Con flores pequeñas, hermafroditas, de color verde amarillento, agrupadas en espigas erectas de hasta 25 cm. Es una planta que se encuentra distribuida en diferentes lugares, por su naturaleza silvestre.

### **Tola**

Arbusto siempre verde, de hasta 80 cm de altura y 70 cm de diámetro. De tallo muy ramificado, hojas alternas, espatuladas de hasta 1,3 cm de longitud.

Se desarrolla en suelos arenosos, pedregosos, areno-arcillosos, en las laderas de los cerros, pampas o lomadas. Puede desarrollarse a alturas elevadas de 3400 a 4500, hasta 4900 msnm.

Planta no comestible por el ganado, se le considera una *invasora* debido al sobrepastoreo del forraje del ganado (*gramineae climax*) y que ha causado degradación en los suelos.

Los **tolares** son extensas áreas en las zonas secas de la cordillera occidental del centro y del sur donde predomina la tola (*Lepidophyllum quadrangulare*), un arbusto resinoso.

Por la misma razón, la tola es talada intensamente para ser utilizada como combustible.

**Fotografía N° 5.2.- Composición de fotos descriptivas de las plantas (Primera etapa)**

	
<p>Eucalipto</p>	<p>Retama</p>
	
<p>Llantén</p>	<p>Tola o taya</p>

En el proceso de fitorremediación la **relación planta-suelo es muy importante**, debido a que si la planta es útil, es decir, absorbe el contaminante (As), lo hará del suelo.

Se prueba diferentes tipos de plantas, todas comunes a la zona de Mayoc, para tratar de encontrar una hiperacumuladora.

En una primera etapa se trabaja con plantas en maceta, lo que permite el análisis de la tierra que las contiene y mantiene. Por lo que, ANTES de iniciar la etapa de RIEGO con ARSÉNICO de las plantas, se analiza la tierra (suelo) de las macetas en donde se cultivan las plantas estudiadas,

### A1) Análisis físico-químico de los suelos

El objetivo de efectuar este tipo de análisis a las muestras de tierra (suelo) de las macetas que contienen las plantas arriba indicadas, es el de determinar algunos parámetros del suelo que tengan relación directa o inversa con el contenido de As (III) absorbido por las plantas.

Los parámetros evaluados son **pH**, **Eh**, **Materia orgánica** y **Humedad**. Los resultados se presentan en la Tabla N° 5.2.

**Tabla N° 5.2.- Parámetros físico-químicos de los suelos de cada planta  
(tierra de maceta en que han sido cultivadas)**

Suelo	pH	Eh (mv)	Materia orgánica MO (%)	Humedad (%)
E1	6,82	413,1	1,71	2,73
E2	6,75	404,5	1,32	2,54
R1	6,61	471,5	1,28	4,3
R2	6,86	410,8	3,16	2,28
LI1	7,03	408,2	1,72	5,18
LI2	7,43	384,2	2,69	5,97
LI3	6,92	430,2	1,38	2,29
T1	7,37	404,6	0,75	1,73
T2	7,29	412,4	0,58	2,94
T3	7,55	381,9	1,14	2,66

Análisis realizados en el Laboratorio de Química Física N° 33 – Facultad de Ciencias U.N.I.

La nomenclatura de los suelos indica la inicial del nombre y número de muestras de cada planta. Las muestras corresponden a los suelos (tierra de maceta de cada planta) analizados. Así: E1, E2 (2 macetas con plántones de Eucalipto); R1, R2 (2 macetas con plántones de Retama); LI1, LI2, LI3 (3 macetas con plántones de Llantén); T1, T2, T3 (3 macetas con plántones de Tola).

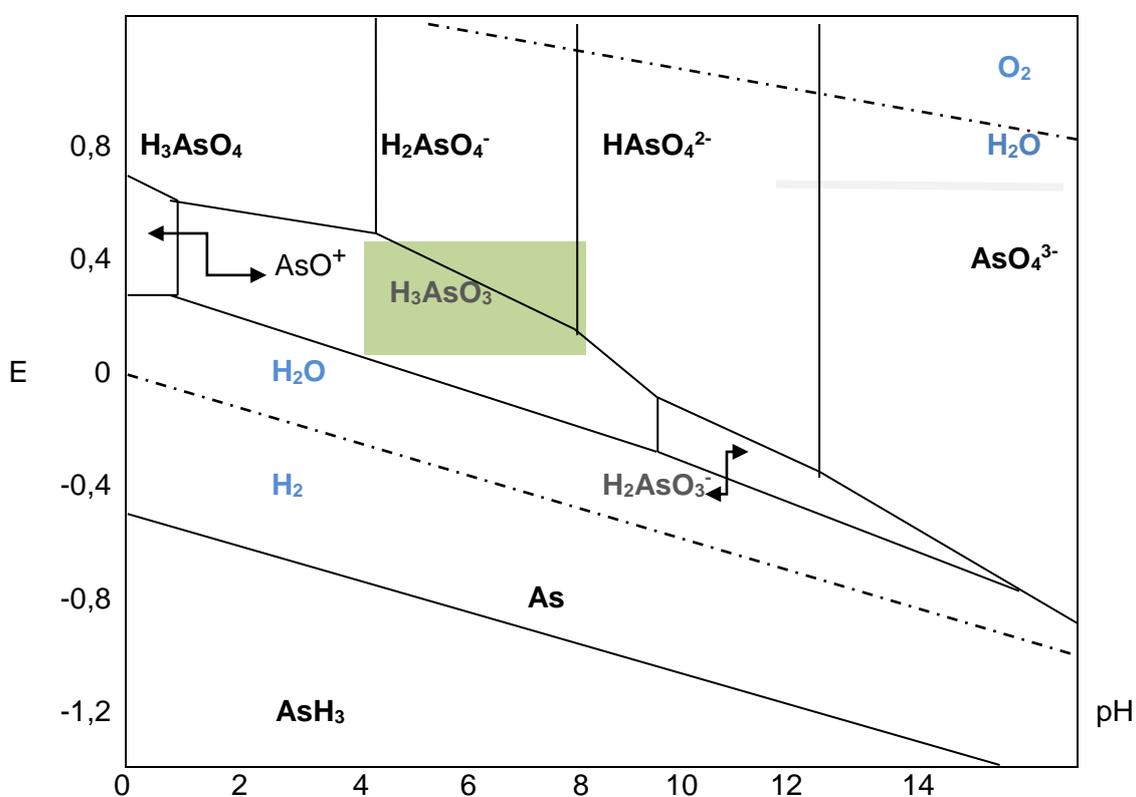
Los **valores de pH** varían de 6,61 a 7,55. De estos se puede indicar que los eucaliptos y retamas se encuentran en suelos muy ligeramente ácidos ( $\text{pH} < 7$ ). Las tres plantas de tola se hallan en suelos muy ligeramente básicos ( $\text{pH} > 7$ ). Las plantas de Llantén presentan 2 muestras muy cercanas a la neutralidad (LI1 a 7,03, LI3 a 6,92) y una muestra LI2 a pH ligeramente básico (7,42).

El **potencial de óxido-reducción Eh**, varía en un rango de 381,9 a 471,5 mv.

De todas las especies, el Eucalipto es el que presenta valores de potencial Eh bastante cercanos (405 y 413 mv) para sus dos muestras de suelo. A este rango corresponden las muestras de suelos de la Retama (R2), Llantén (LI1) y Tola (T1 y T2).

Según el Diagrama de Pourbaix (Eh-pH) del As en aguas (Diagrama N° 5.1), los potenciales arriba indicados en relación con el pH corresponden a suelos casi neutros que tienden a oxidantes. En la gráfica, zona resaltada, el As en agua y suelos con valores de Eh alrededor de 400 mv (y mayores) es predominantemente Arseniato o As (V).

**Diagrama N° 5.1.- Diagrama de Pourbaix (E – pH) de Arsénico; C = 10<sup>-2</sup> M.**



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

El rango de valores del contenido del porcentaje de Materia Orgánica es **0,58-3,16 %** y en Humedad es **1,7-5,97 %** en todos los suelos analizados.

De todas las muestras, sólo el suelo del eucalipto, en sus dos muestras, mantiene valores muy cercanos (1,5 % MO y 2,6 % Humedad, en promedio).

Las demás muestras de suelos presentan porcentajes variados, dentro de los rangos presentados, incluso tratándose de suelos correspondientes a la misma especie de planta.

### **A2) Riego de las plantas en maceta**

Como agua de riego se usa una solución acuosa de la sal de As(III), Arsenito de sodio ( $\text{Na}_3\text{AsO}_3$ , de 100, 80 y 5 ppm) cuya solución diluida se lleva a un pH ligeramente básico.

Las primeras pruebas se llevan a cabo con las plantas de **Eucalipto** y **Retama**.

Las condiciones y tiempo de riego de estas plantas se indican en la Tabla N° 5.3.

**Tabla N° 5.3.- Tiempo de riego y Concentraciones de las soluciones de As (III) usadas en riego de Eucalipto y Retama**

<b>Semana de riego</b>	<b>Eucalipto</b>	<b>Retama</b>	<b>Observaciones</b>
1 <sup>a</sup>	100 ppm	100 ppm	Al observar ligeros signos de cambio en el aspecto de las plantas (las hojas van tornándose un poco secas), quizás por el exceso de As (III) (concentraciones de 100 y 80 ppm) en las dos primeras semanas de riego, se reduce la concentración a 5 ppm y finalmente se suspende el riego al culminar la 3 <sup>a</sup> semana.
2 <sup>a</sup>	80 ppm	80 ppm	
3 <sup>a</sup>	5 ppm	5 ppm	
4 <sup>a</sup>	---	---	

Luego de las pruebas con Eucalipto y Retama durante 3 semanas, se suspende el riego y se analizan las muestras al finalizar la 4<sup>a</sup> semana, como se indica más adelante (A3).

Las pruebas con **Llantén hembra** y **Tola** varían respecto a las pruebas con Eucalipto y Retama. El riego es por 4 semanas. Las condiciones y tiempo de riego en la Tabla N° 5.4.

**Tabla N° 5.4.- Tiempo de riego y Concentraciones de las soluciones de As (III) usadas en riego de las plantas Llantén y Tola**

<b>Semana de riego</b>	<b>Llantén</b>	<b>Tola</b>	<b>Observaciones</b>
1 <sup>a</sup>	5 ppm	5 ppm	El tiempo de riego fue de 1 mes en este caso, debido a que en algunas muestras empiezan a manifestarse signos de deterioro en las plantas. El llantén empezó a cambiar de color verde a rosáceo, mientras que las otras especies no presentaron este cambio.
2 <sup>a</sup>	5 ppm	5 ppm	
3 <sup>a</sup>	5 ppm	5 ppm	
4 <sup>a</sup>	5 ppm	5 ppm	

El volumen de solución de riego en todos los casos fue de aproximadamente 50 mL.  
La frecuencia de riego es interdiario.

### **A3) Determinación analítica del arsénico en las muestras vegetales**

En esta primera etapa se analiza por separado los tallos y las hojas para estudiar cuáles son las partes que absorben mayor cantidad del tóxico.

***Cada semana indicada se toma una muestra de cada parte de la planta que se analiza, para comprobar si la planta va absorbiendo gradualmente el arsénico.***

### Pre-tratamiento de las muestras para el análisis

Para obtener el arsénico de las plantas regadas, se secan las muestras a 60-80 °C durante 48 horas. Después se muelen y tamizan en malla de 1mm.

De cada muestra se pesan muestras de 250 mg y se digieren según el método de Soon.

### Digestión nítrico-perclórica (Método de Soon, 1998)

A la muestra (0.25 g de material vegetal seco) colocada en un erlenmeyer de 50 mL, se añade 3 mL de **ácido nítrico concentrado** y se digiere durante 12 horas.

Después se calienta durante 1 hora, a una temperatura máxima de 150 °C, hasta oxidación total. Posteriormente, se agrega 1 mL de **ácido perclórico concentrado**, calentando a 200° C durante 1 hora más, hasta que el líquido queda transparente.

Se enrasa en fiola de 50 mL y se conserva en refrigeración hasta su análisis.

La determinación analítica aplicada es la **Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)** se basa en que una antorcha de ICP sirve como atomizador e ionizador y produce iones positivos de metales, los que se introducen en un espectrómetro de masas, MS, a través de una interfase de vacío diferencial.

El número de análisis de cada tipo de planta varía de acuerdo a la disponibilidad de las mismas. Los resultados se indican en las Tablas N° 5.5 y 5.6.

**Tabla N° 5.5.- Contenido de As (mg/L) en hojas y tallos de Eucalipto y Retama en diferentes etapas de riego**

<b>Planta →</b>	<b>Eucalipto (2 muestras: E1 y E2)</b>			
<b>Tiempo de exposición ↓</b>	<b>E1 hojas</b>	<b>E1 tallo</b>	<b>E2 hojas</b>	<b>E2 tallo</b>
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0054	0,0078	0,0011	0,0010
A 1 semana de riego	0,0078	0,0094	0,0171	0,0031
Después de 4 semanas	0,0612	0,0221	0,0521	0,0230
<b>Planta →</b>	<b>Retama (2 muestras: R1 y R2)</b>			
<b>Tiempo de exposición ↓</b>	<b>R1 hojas</b>	<b>R1 tallo</b>	<b>R2 hojas</b>	<b>R2 tallo</b>
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0054	0,0022	0,0010	0,0001
A 1 semana de riego	0,0065	0,0075	0,0021	0,0062
Después de 4 semanas	0,0195	0,0109	0,0291	0,025

Concentraciones obtenidas con la técnica ICP-MS (Cortesía INASSA-Proyecto Tesis)

Las hojas del eucalipto E1 y E2 absorben **10 y 45 veces más** de su contenido de **As inicial**, respectivamente. Los tallos son más limitados en la absorción de As, E1 y E2 absorben **3 y 23 veces**, respectivamente, su contenido inicial.

Las hojas de retama R1 y R2 absorben **3,5 y 29 veces** más de su contenido de As inicial, respectivamente. Los tallos de Retama, R1 y R2 en cambio, absorben **5 y 250 veces**, respectivamente, el contenido inicial. No existe correlación ni repetibilidad en los resultados obtenidos, quizás porque cada planta corresponde a una maceta diferente y/o zona diferente (a diferencia de lo que sugiere la bibliografía).

Lo que indica el resultado de estas pruebas es que las especies absorben As, unas más en los tallos y otras en las hojas y debido a este hecho en la siguiente experiencia con diferentes plantas, no se analizan las muestras de las plantas durante cada semana.

Las especies de **Llantén hembra** y **Tola** se trabajan con tres muestras de cada una, es decir hay 3 macetas de cada planta. Para los análisis también se separan hojas de tallo, en cada muestra de planta. Los resultados de los análisis respectivos en la Tabla N° 5.6.

**Tabla N° 5.6.- Contenido de As (mg/L) en hojas y tallos de Llantén hembra y Tola en diferentes etapas de riego**

Planta →	Llantén hembra (3 muestras: LI1, LI2 y LI3)					
Tiempo de exposición	LI1 hojas	LI1 tallo	LI2 hojas	LI2 tallo	LI3 hojas	LI3 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0335	0,0255	0,0510	0,0240	0,0385	0,0410
A 4 semanas de riego	0,0575	0,0305	0,1310	0,0345	0,0425	0,0530
Planta →	Tola (3 muestras: T1, T2 y T3)					
Tiempo de exposición	T1 hojas	T1 tallo	T2 hojas	T2 tallo	T3 hojas	T3 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0325	0,0250	0,0250	0,0105	0,0155	0,0350
A 4 semanas de riego	0,0465	0,0295	0,0335	0,0140	0,0455	0,0860

Concentraciones obtenidas con la técnica ICP-MS (Cortesía INASSA-Proyecto Tesis)

En las hojas de **Llantén** la absorción de As es más pobre, sólo la muestra **LI2 supera apenas el doble** del contenido de As inicial. En los tallos ninguna de las muestras logra duplicar el contenido inicial de As.

En las hojas de **Tola** la absorción de As es también pobre, sólo la muestra **T3 supera casi el triple del valor inicial**. Igualmente en **el tallo de** la misma muestra **T3**, se logra **superar el doble del contenido inicial** de As.

**Como se ha observado en los resultados de As obtenidos en hojas y plantas, estas presentan un contenido inicial del contaminante.** Las plantas ya tienen As antes de regarlas con la solución de este.

Cálculo del contenido REAL de As ABSORBIDO por las plantas

El contenido de As correspondiente a **T<sub>0</sub>: inicio del experimento**, corresponde al **Blanco (BK) del contenido de As en las plantas** (tiempo en que no empieza el riego de la planta en el Laboratorio). El cálculo del **contenido real de As ABSORBIDO** por cada planta debe hacerse restando este valor denominado BK, del valor obtenido al final del tiempo de prueba, es decir del máximo contenido de As en cada muestra analizada.

La Tabla N° 5.7 indica el **contenido REAL de As ABSORBIDO por Eucalipto y Retama**, aplicando la resta entre los valores de As:

$$\text{(Contenido de As final – Contenido de As a T}_0\text{ (Blanco))}$$

**Tabla N° 5.7.- Contenido real de As (mg/L) en hojas y tallos de Eucalipto y Retama**

Planta →	Eucalipto (2 muestras: E1 y E2)			
Tiempo de exposición ↓	E1 hojas	E1 tallo	E2 hojas	E2 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0054	0,0078	0,0011	0,0010
Después de 4 semanas	0,0612	0,0221	0,0521	0,0230
<b>As absorbido real</b>	<b>0,0558</b>	<b>0,0143</b>	<b>0,0510</b>	<b>0,0220</b>
Planta →	Retama (2 muestras: R1 y R2)			
Tiempo de exposición ↓	R1 hojas	R1 tallo	R2 hojas	R2 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0054	0,0022	0,0010	0,0001
Después de 4 semanas	0,0195	0,0109	0,0291	0,025
<b>As absorbido real</b>	<b>0,0141</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0281</b>	<b>0,0249</b>

Como se observa, se anula la información correspondiente a la cantidad de As absorbido en la primera semana de riego, porque esta sólo confirma que la planta está asimilando la presencia del As en el suelo y lo empieza a absorber.

Por esta razón en los experimentos con Llantén y Tola sólo se obtiene el contenido de As absorbido antes del riego (T<sub>0</sub> o BK) y al final de las 4 semanas de riego, por lo que la resta se hace de la misma manera y no hay que eliminar ningún dato.

La Tabla N° 5.8 indica los resultados correspondientes a las muestras de **Llantén y Tola**, luego de aplicar el mismo procedimiento.

**Tabla N° 5.8.- Contenido real de As (mg/L) en hojas y tallos de Llantén y Tola**

Planta →	Llantén hembra (3 muestras: LI1, LI2 y LI3)					
Tiempo de exposición	LI1 hojas	LI1 tallo	LI2 hojas	LI2 tallo	LI3 hojas	LI3 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0335	0,0255	0,0510	0,0240	0,0385	0,0410
A 4 semanas de riego	0,0575	0,0305	0,1310	0,0345	0,0425	0,0530
<b>As absorbido</b>	<b>0,0240</b>	<b>0,0050</b>	<b>0,0800</b>	<b>0,0105</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0120</b>
Planta →	Tola (3 muestras: T1, T2 y T3)					
Tiempo de exposición	T1 hojas	T1 tallo	T2 hojas	T2 tallo	T3 hojas	T3 tallo
T <sub>0</sub> : inicio del experimento	0,0325	0,0250	0,0250	0,0105	0,0155	0,0350
A 4 semanas de riego	0,0465	0,0295	0,0335	0,0140	0,0455	0,0860
<b>As absorbido</b>	<b>0,0140</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,0035</b>	<b>0,0300</b>	<b>0,0510</b>

Cambio de unidades de mg/L a mg/kg

La concentración de As se da en **mg/L** debido a que los resultados de los análisis se basan en la lectura de los estándares de As (III) en solución acuosa de arsenito (mg/L), en el equipo utilizado para la técnica ICP-MS.

Sin embargo **LOS RESULTADOS DE LA PRESENCIA DE As EN LAS PLANTAS** que tienen la capacidad de absorberlo, se suele indicar en **mg/kg** (relación de masas: masa de As en miligramos por kg de planta analizada).

Los resultados de las tablas anteriores (N° 5.7 y 5.8) en mg/L se refieren a que cada muestra de planta analizada presenta una concentración de **n** mg As por litro de solución. Para explicar las unidades a usarse de aquí en adelante, se indica el procedimiento de cálculo, con el **contenido real de As** en las hojas de la muestra 1 de Tola (T1) a 4 semanas de riego: 0,0140 mg/L, como ejemplo.

- i. Si en 1 litro de solución de As hay 0,014 mg As, en 50 mL de solución habrá 20 veces menos. El volumen de referencia, menor, de 50 mL, se debe a que la muestra de la planta analizada, es secada, molida y disuelta con ácidos, y finalmente enrasada a un volumen de 50 mL. El resultado de este paso es de 0,0007 mg As.
- ii. Esta masa (0,0007 mg As) corresponde al arsénico extraído de una muestra de 250 mg de planta tratada como se ha indicado en (i), (ya sea hojas o tallo). Por lo que al multiplicar dicha cantidad por el factor 4000 (convierte los 250 mg de planta en 1 kg de la misma), se obtiene la concentración de As en **mg/kg**.

Así, en este caso sería **2,8 mg/kg**.

Estos dos pasos se reúnen multiplicando cada contenido de As en mg/L, por el factor [(50/1000) x 4000] igual a **200**. Aplicando este procedimiento a cada resultado de las Tablas N° 5.6 y N° 5.7 (se multiplica cada dato de las Tablas indicadas, por el factor 200), se obtiene el **contenido real de As en mg/kg**. Ver Tablas N° 5.9 y 5.10.

**Tabla N° 5.9.- Contenido real de As (mg/kg) en hojas y tallos de Eucalipto y Retama**

Planta →	Eucalipto (2 muestras: E1 y E2)			
	E1 hojas	E1 tallo	E2 hojas	E2 tallo
<b>As absorbido</b>	<b>11,16</b>	<b>2,86</b>	<b>10,2</b>	<b>4,4</b>

Planta →	Retama (2 muestras: R1 y R2)			
	R1 hojas	R1 tallo	R2 hojas	R2 tallo
<b>As absorbido</b>	<b>2,82</b>	<b>1,74</b>	<b>5,62</b>	<b>4,98</b>

Los resultados del **contenido real de As ABSORBIDO en (mg/kg)** en las plantas de **Llantén hembra** y **Tola** tratadas, se presentan en la Tabla N° 5.10.

**Tabla N° 5.10.- Contenido real de As (mg/kg) en hojas y tallos de Llantén y Tola**

Planta →	Llantén hembra (3 muestras: LI1, LI2 y LI3)					
	LI1 hojas	LI1 tallo	LI2 hojas	LI2 tallo	LI3 hojas	LI3 tallo
<b>As absorbido</b>	<b>4,8</b>	<b>1,0</b>	<b>16,0</b>	<b>2,1</b>	<b>0,8</b>	<b>2,4</b>

Planta →	Tola (3 muestras: T1, T2 y T3)					
	T1 hojas	T1 tallo	T2 hojas	T2 tallo	T3 hojas	T3 tallo
<b>As absorbido</b>	<b>2,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,7</b>	<b>0,7</b>	<b>6,0</b>	<b>10,2</b>

Los resultados también son disímiles, sin repetibilidad o cercanía entre especies iguales. Sólo un ejemplar de hojas de Llantén absorbe más As que el contenido inicial (LI2). En una muestra de Tola (T3) se observa que es la única que absorbe más As que su contenido inicial, tanto en hojas como tallo.

#### Relación entre el contenido de As en las plantas y el pH del suelo

Se establece la relación entre los valores de As absorbido por las diferentes plantas, es decir el As TOTAL (suma de As en hojas y tallo) en cada especie de planta tratada, con respecto al pH del suelo correspondiente a cada una. Ver Tabla N° 5.11.

**Tabla Nº 5.11.- Relación entre As total absorbido por la planta y pH del suelo**

Suelo	pH	As (mg/kg)		As (mg/kg)
		hojas	tallos	TOTAL (Hojas + Tallo)
E1	6,82	11,2	2,9	14,1
E2	6,75	10,2	4,4	14,6
<b>Promedio</b>		<b>10,7</b>	<b>3,7</b>	<b>14,3</b>
R1	6,61	2,8	1,7	4,5
R2	6,86	5,6	5,0	10,6
<b>Promedio</b>		<b>4,2</b>	<b>3,4</b>	<b>7,6</b>
LI1	7,03	4,8	1,0	5,8
<b>LI2</b>	7,43	<b>16,0</b>	2,1	<b>18,1</b>
LI3	6,92	0,8	2,4	3,2
<b>Promedio</b>		<b>7,2</b>	<b>1,8</b>	<b>9,0</b>
T1	7,37	2,8	0,9	3,7
T2	7,29	1,7	0,7	2,4
<b>T3</b>	7,55	6,0	<b>10,2</b>	<b>16,2</b>
<b>Promedio</b>		<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>7,4</b>

Individualmente las plantas que más absorben As (mg/kg) son el **Llantén hembra** (LI2) en hojas y en total, en segundo lugar la **Tola** (T3) en tallo y en total. Ambos casos corresponden a valores de pH del suelo, bastante cercanos (7,43 y 7,55). Es decir en suelos ligeramente básicos.

El valor más bajo del pH en suelos (6,61) corresponde a la Retama y a los valores más bajos de As en hojas, tallo y total.

Aunque no se puede sacar una conclusión debido a que en el caso de la Tola (muestra 2) se tiene el caso siguiente de valores más bajos de absorción de As (hojas y tallo) pero a pH distinto (7,29) y siendo una especie distinta a la retama. Llama la atención la falta de repetibilidad en los resultados de As absorbido en plantas consideradas similares, es decir de la misma especie (se pueden considerar muestras de una misma planta).

Para estudiar la causa de este comportamiento se debe hacer una prospección de plantas y suelos de una misma área y que hayan crecido una muy cerca de la(s) otra(s), como se recomienda en el procedimiento o protocolo de trabajo en campo.

#### Relación entre el contenido de As en las plantas y el Potencial (Eh) del suelo

Se establece la relación entre los valores de As total absorbido por las diferentes plantas, y As (en hojas y tallo) en cada especie de planta tratada, con respecto al Potencial de óxido-reducción (Eh) del suelo correspondiente a cada una.

En la Tabla Nº 5.12 se muestra la correlación de los parámetros indicados.

**Tabla Nº 5.12.- Relación entre As total absorbido por la planta y Eh del suelo**

Suelo	Eh (mv)	As (mg/kg)		As (mg/kg)
		hojas	tallos	TOTAL (Hojas + Tallo)
E1	413,1	11,2	2,9	<b>14,1</b>
E2	404,5	10,2	4,4	<b>14,6</b>
<b>Promedio</b>		<b>10,7</b>	<b>3,7</b>	<b>14,3</b>
<b>R1</b>	<b>471,5</b>	2,8	1,7	<b>4,5</b>
R2	410,8	5,6	5,0	<b>10,6</b>
<b>Promedio</b>		<b>4,2</b>	<b>3,4</b>	<b>7,6</b>
LI1	408,2	4,8	1,0	<b>5,8</b>
<b>LI2</b>	<b>384,2</b>	16,0	2,1	<b>18,1</b>
LI3	430,2	0,8	2,4	<b>3,2</b>
<b>Promedio</b>		<b>7,2</b>	<b>1,8</b>	<b>9,0</b>
T1	404,6	2,8	0,9	<b>3,7</b>
T2	412,4	1,7	0,7	<b>2,4</b>
<b>T3</b>	<b>381,9</b>	6,0	<b>10,2</b>	<b>16,2</b>
<b>Promedio</b>		<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>7,4</b>

El rango de valores de Eh (382 - 472 mv) corresponde a un suelo oxidante y con valores de pH muy cercanos a la neutralidad.

Los **valores más altos de absorción de arsénico están asociados a los valores más bajos de potencial óxido-reductor.**

Según el diagrama de Pourboux (E - pH) del As, predomina el As (V) o arseniato, a las condiciones experimentales de los suelos correspondientes a las plantas estudiadas, por lo que sería lógico que al mayor valor de Eh (471,5 mv) en el caso de la retama (R1), corresponda el menor valor de absorción de As.

#### Relación del contenido de As en las plantas con Materia orgánica y Humedad del suelo

Se establece la relación entre los valores de As total absorbido por las diferentes plantas, y As (en hojas y tallo) en cada especie de planta tratada, con respecto al %MO (Materia orgánica) y al %Humedad del suelo correspondiente a cada una.

En la Tabla Nº 5.13 se muestra la correlación de los parámetros indicados.

**Tabla N° 5.13.- Relación entre As total absorbido por la planta  
con % Materia orgánica y % Humedad del suelo**

Suelo	MO %	Humedad %	As (mg/kg)		TOTAL As (mg/kg) (Hojas + Tallo)
			hojas	tallos	
E1	1,71	2,73	11,2	2,9	14,1
E2	1,32	2,54	10,2	4,4	14,6
<b>Promedio</b>			<b>10,7</b>	<b>3,7</b>	<b>14,3</b>
<b>R1</b>	1,28	4,3	2,8	1,7	4,5
R2	3,16	2,28	5,6	5,0	10,6
<b>Promedio</b>			<b>4,2</b>	<b>3,4</b>	<b>7,6</b>
LI1	1,72	5,18	4,8	1,0	5,8
<b>LI2</b>	<b>2,69</b>	<b>5,97</b>	16,0	2,1	<b>18,1</b>
LI3	1,38	2,29	0,8	2,4	3,2
<b>Promedio</b>			<b>7,2</b>	<b>1,8</b>	<b>9,0</b>
T1	0,75	1,73	2,8	0,9	3,7
T2	0,58	2,94	1,7	0,7	2,4
<b>T3</b>	1,14	2,66	6,0	<b>10,2</b>	<b>16,2</b>
<b>Promedio</b>			<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>7,4</b>

El mayor valor de absorción total de As corresponde al mayor porcentaje de humedad (para la muestra 2 del Llantén hembra, 5,97%) y uno de los valores elevados en materia orgánica.

Los valores más bajos de % MO correspondientes a la Tola en sus muestras T1 y T2, concuerdan también en estar entre los valores más bajos de As absorbido.

El valor más bajo (3,2 mg/kg de As) absorbido por el Llantén LI3, corresponde a valores un poco por debajo de la mediana del rango de **0,58-3,16 % MO** y de **1,7-5,97 % Humedad**. Estos resultados no permiten hacer generalizaciones. Como en los casos de los otros parámetros (pH y Eh) no hay concordancia entre los resultados en muestras de plantas de una misma especie.

De estos resultados obtenidos en la llamada primera etapa, se observa que lo más importante es que las plantas han habido absorción del arsénico. Sin embargo, resalta la relativa baja respuesta de absorción de las especies tratadas, sobre todo de la falta de repetibilidad o cercanía de resultados entre muestras de la misma especie.

Parece ser que las condiciones de las 10 muestras de suelo analizadas, cuyo pH es bastante cercano a la neutralidad y el rango de valores del potencial Eh, favorecen la oxidación del As (III) a As (V). Además puede ser que el carácter más tóxico del As (III) sea la razón del inicio del deterioro de las mismas.

## **(B) SEGUNDA ETAPA - OCTUBRE 2009**

En la primera etapa de ensayo se riegan las muestras con solución de As (III), y se obtienen resultados relativamente pobres.

Al encontrar mayor información respecto a las formas de absorción del arsénico, se procede a una segunda etapa con soluciones de As (V).

La idea inicial fue repetir los experimentos de absorción con los mismos tipos de plantas pero con soluciones de As (V). Sin embargo, al no poder encontrar todas las plantas utilizadas en la primera fase, regadas con As (III), para hacer las pruebas de absorción con soluciones de As (V) y ante la premura del tiempo se escoge las plantas indicadas a continuación.

Sólo una de las plantas se pudo adquirir en maceta (**verbena**), las demás se pudieron adquirir con raíces pero sin maceta.

### **DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS ESCOGIDAS**

#### **Diente de león**

El diente de león es una planta herbácea que crece unos 40 centímetros. La raíz es oscura, con un látex blanquecino. Las hojas son de color verde brillante y están profundamente divididas en segmentos triangulares desiguales; las hojas aparecen en la base, dispuestas circularmente. Las flores son amarillas, y están unidas a la base por un largo tallo. Planta muy común en todo el hemisferio norte. Crece en lugares húmedos, pastos y terrenos abandonados.

El **diente de león**, llamado así principalmente por las pequeñas y recortadas hojas que posee, es una planta vivaz que crece en todas las regiones del mundo, y viene a ser ideal como **depurativo** cuando, por ejemplo, deseamos facilitar las distintas funciones de eliminación tanto digestivas como renales.

#### **Verbena**

La verbena es una planta herbácea perteneciente a la familia de las verbenáceas, que reúne aproximadamente unas ochocientas especies, herbáceas o leñosas. De hasta 1 m de alto. Tiene un tallo anguloso, ramificado en su parte superior y con hojas opuestas y recortadas. Es una especie muy extendida por Europa, Asia y África, creciendo sobre todo entre los escombros, en las cunetas y lugares abandonados, siempre que estén abrigados del viento. Se desarrolla de manera silvestre y cultivada en la costa, sierra y selva de nuestro país, hasta los 4,000 msnm.

## Chincho

De la misma familia que el huacatay es una planta de aromas de menor agresividad que el huacatay. Por lo mismo muy utilizada en gastronomía.

### Fotografía N° 5.3.- Composición de fotos descriptivas de las plantas (Segunda etapa)

	
Diente de león	Verbena
	
Llantén	Chincho

### **B1) Tratamiento de las plantas**

Se trabaja con una solución acuosa de As (V), la sal de Arseniato ácido de sodio heptahidratado ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en una concentración de 20 ppm.

Se usa como agua de riego para la maceta de verbena. En el resto de plantas sin maceta, se aplica la técnica de **Rizofiltración**, es decir, raíces sumergidas en la solución de As (V).

La Tabla N° 5.14 se resume el tratamiento aplicada a las plantas.

**Tabla N° 5.14.- Técnicas aplicadas y duración de las mismas en tratamiento de las plantas con soluciones de As (V) 20 ppm**

Plantas	Chincho	Diente de león	Llantén	Verbena
Técnica	Rizofiltración	Rizofiltración	Rizofiltración	Riego en maceta
Tiempo (días)	8	8	8	10
El tiempo aplicado depende del deterioro de las plantas, empiezan a secarse y amarillarse.				

Diferencias con la Primera etapa

- **Se trabaja con las muestras de cada planta por duplicado, una muestra es tratada con la solución de As (V) y la otra sirve de Blanco (BK), es decir, no recibe solución de As, solamente se mantiene en agua (Rizofiltración) o se riega con agua.**
- **En la segunda etapa no se analiza cada semana el avance de la absorción (el tiempo de tratamiento no llega a 2 semanas) y no se separa hojas de tallo, dados los resultados relativamente bajos obtenidos en la primera etapa.**

Pre-tratamiento de las muestras para el análisis

Para obtener el arsénico de las plantas regadas, se secan las muestras en estufa a 70 °C durante 48 horas. Después se muelen, se pasan por tamiz malla 20 y se guardan en frasco de vidrio.

Digestión nítrico-perclórica (Método de Soon, 1998)

Se aplica el mismo método que en el caso anterior sólo que en esta etapa no se trabaja con los 250 mg de planta seca. En este tratamiento se usa diferentes cantidades de muestra (**solamente hojas** de las plantas secadas).

En la Tabla N° 5.15 se incluyen los valores de los pesos de hojas secas de cada planta tratada con As (V), y de los Blancos (sin recibir As), además de los volúmenes de ácidos.

**Tabla N° 5.15.- Pesos de las muestras de plantas secas molidas y procesadas con la mezcla ácida.**

Especie	Pesos (mg)		Mezcla ácida (mL)
	BK	As (V)	HNO <sub>3</sub> /HClO <sub>4</sub>
Nombre común			
<b>Chincho</b>	390	470	<b>5 / 1</b>
<b>Diente de León</b>	380	500	<b>6 / 1</b>
<b>Llantén</b>	500	500	<b>5 / 1</b>
<b>Verbena</b>	500	500	<b>4 / 2</b>

Los ácidos usados son concentrados.

Fuente: Laboratorio de Química-Física N° 33 – Facultad de Ciencias, U.N.I. 2009.

Para determinar el contenido de As (V) en todas las muestras, estas se analizan con la técnica Espectrofotométrica de Absorción Atómica con generación de hidruros.

Todos los resultados se consignan en la Tabla N° 5.16.

**Tabla N° 5.16.- Resultados de la absorción de As (V) por plantas**

Especie	Resultados de As en mg/L		Resultados de As absorbido
	BK	As (V)	mg / L
Nombre común			
<b>Chincho</b>	0,047	0,167	<b>0,12</b>
<b>Diente de León</b>	0,030	0,656	<b>0,626</b>
<b>Llantén</b>	0,016	0,702	<b>0,686</b>
<b>Verbena</b>	0,071	0,134	<b>0,063</b>

Fuente: Laboratorio de Espectrometría – FIGMM U.N.I. 2009.

El As (V) absorbido por las hojas de las plantas tratadas con el contaminante se calcula restando el valor de la columna BK de la columna As (V).

Los valores denominados BK corresponden al As que contienen las plantas sin ser regadas con la solución de As (V).

Al igual que en la primera etapa la concentración de As en las muestras de plantas, expresadas en **mg/L deben transformarse en mg/kg**.

Sin embargo como los pesos de las muestras de Blancos y con As (V) son diferentes no puede aplicarse el mismo factor (200 en la primera etapa). En este caso cada factor varía como varía el peso de cada muestra. Ver Tabla N° 5.17.

**Tabla Nº 5.17.- Resultados de la absorción de As (V) por plantas en mg/kg**

Espece	As absorbido	Peso muestra	As absorbido mg/kg	Resultados de As absorbido**
Nombre común	As (mg / L)*	W (mg)	Factor aplicado: (50 000 As / W)	mg / kg
<b>Chincho BK</b>	<b>0,047</b>	390	6,03	
<b>Chincho As</b>	<b>0,167</b>	470	17,8	<b>11,8</b>
<b>Diente de León BK</b>	<b>0,030</b>	380	3,95	
<b>Diente de León As</b>	<b>0,656</b>	500	<b>65,6</b>	<b>61,6</b>
<b>Llantén BK</b>	<b>0,016</b>	500	1,6	
<b>Llantén As</b>	<b>0,702</b>	500	70,2	<b>68,6</b>
<b>Verbena BK</b>	<b>0,071</b>	500	7,1	
<b>Verbena As</b>	<b>0,134</b>	500	13,4	<b>6,3</b>

\* Laboratorio de Espectrometría – FIGMM U.N.I. 2009.

\*\* Ejemplo: (Chincho As – Chincho BK) mg/kg = 17,8 – 6,03 = 11,8 mg/kg

Los valores de **As absorbido real (mg/kg)** en la última columna sólo se consignan en las muestras de hojas de plantas que han recibido solución de As (V), puesto que se han restado los valores de las muestras BK de las muestras tratadas con As.

### 5.3.5.3 Resultados comparativos de la parte experimental

Para indicar las técnicas experimentales de absorción en ambas etapas se resume la información en la Tabla Nº 5.18.

**Tabla Nº 5.18.- Comparación de Técnicas experimentales de absorción de As aplicadas a plantas**

Espece Nombre común	Técnica aplicada	Solución de As	Tiempo (días)	Observaciones
<b>Eucalipto</b>	Riego en maceta	As (III)	21	Riego semanal con diferente concentración As: 100, 80 y 5 ppm, en la semana 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> y 3 <sup>a</sup> respectivamente.
<b>Retama</b>	Riego en maceta		21	
<b>Llantén hembra</b>	Riego en maceta		28	
<b>Tola</b>	Riego en maceta			
<b>Chincho</b>	Rizofiltración	As (V) 20 ppm	8	Las raíces de las plantas se sumergen en la solución de As indicada por el tiempo indicado.
<b>Diente de León</b>	Rizofiltración		8	
<b>Llantén</b>	Rizofiltración		8	
<b>Verbena</b>	Riego en maceta		10	

Para comparar los resultados de las soluciones de As (III y V) absorbidos por las diferentes plantas se resume estos en las tablas N° 5.19 y N° 5.20.

**Tabla N° 5.19.- Resultados de la absorción de As (III) por hojas de las plantas**

Especie	Resultados de As en mg/ikg		Resultados de As absorbido
	Hojas	Tallos	TOTAL mg / kg
Nombre común			
<b><i>Eucalipto</i></b>	11,2	2,9	<b>14,1</b>
	10,2	4,4	<b>14,6</b>
<b>Promedio</b>	<b>10,7</b>	<b>3,7</b>	<b>14,3</b>
<b><i>Retama</i></b>	2,8	1,7	<b>4,5</b>
	5,6	5,0	<b>10,6</b>
<b>Promedio</b>	<b>4,2</b>	<b>3,4</b>	<b>7,6</b>
<b><i>Llantén</i></b>	4,8	1,0	<b>5,8</b>
	<b>16,0</b>	2,1	<b>18,1</b>
	0,8	2,4	<b>3,2</b>
<b>Promedio</b>	<b>7,2</b>	<b>1,8</b>	<b>9,0</b>
<b><i>Tola</i></b>	2,8	0,9	<b>3,7</b>
	1,7	0,7	<b>2,4</b>
	6,0	<b>10,2</b>	<b>16,2</b>
<b>Promedio</b>	<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>7,4</b>

**Tabla N° 5.20.- Resultados de la absorción de As (V) por hojas de las plantas**

Especie	Resultados de As en mg/L		Resultados de As absorbido
	BK	As	mg / kg
Nombre común			
<b><i>Chincho</i></b>	0,047	0,167	<b>11,8</b>
<b><i>Diente de León</i></b>	0,030	0,656	<b>61,6</b>
<b><i>Llantén</i></b>	0,016	0,702	<b>68,6</b>
<b><i>Verbena</i></b>	0,071	0,134	<b>6,3</b>

Fuente: Laboratorio de Espectrometría – FIGMM U.N.I. 2009.

Se debe considerar que la capacidad de fitoextracción de una planta depende tanto de su conformación genética como de las condiciones ambientales a las que está sometida.

Comparando los valores de As absorbido se observa que nuevamente el Llantén obtiene el valor más grande de As (III) absorbido (LI2 en hojas y total, en la primera etapa) y el Llantén que absorbe As (V) también encontrado analizando las hojas y con la diferencia que con una técnica de absorción por rizofiltración (no en maceta).

## CAPÍTULO VI

### 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El arsénico es uno de los contaminantes que forma parte de los residuos peligrosos generados por la actividad minero-metalúrgica en Mayoc desde tiempo atrás. Se dispersa y transporta como parte del material particulado por acción del viento y precipitaciones pluviales y se acumula en los suelos del entorno, llegando quizás hasta el interior de las viviendas. El depósito de relaves Mayoc sin adecuado tratamiento y antes de su traslado, ha constituido durante años otra fuente de material particulado, que expuso a los habitantes del entorno también al arsénico, entre otros elementos nocivos.

#### 6.1 Evaluación de la Información

En los dos primeros capítulos se recoge información acerca de:

- 1º) La zona en estudio y los procesos industriales que se llevan a cabo en ella, durante los años de 1998 a 2005, es decir, Mayoc y el depósito de relaves que estuvo depositado en dicho lugar y que albergaba los desechos de las actividades de la Planta Concentradora Tamboraque, ubicada en una zona cercana a Mayoc. Los relaves que fueron almacenados en el Depósito de Relaves Mayoc después fueron trasladados a Tamboraque y ahora deben trasladarse a Chinchán.
- 2º) El arsénico, sus propiedades físico-químicas y geoquímicas, que explican su presencia natural en agua, aire, suelo y plantas. Su ciclo biogeoquímico

En el Capítulo III se revisa la dispersión del arsénico generado por el proceso industrial y su posible acción contaminante en los cuerpos receptores, *aire, agua y suelos*, mediante los resultados de monitoreos. Los 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. En cuanto a la meteorología, se considera datos relevantes la dirección y velocidad de los vientos y con respecto a la topografía, las características propias de la zona determinan el tipo de dispersión del contaminante. En la zona de estudio **predomina una dirección de vientos de SW a NE**, con **velocidades promedio bajas** de aproximadamente **6 km/h** y se destacan las montañas características de una topografía abrupta.

Estas 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), el transporte de material particulado **es** hacia la zona poblada.

El material particulado sedimentado y disperso en toda la zona, incluyendo el interior de las viviendas, puede llegar hasta a los alimentos preparados. Además se podría estar ingiriendo alimentos producidos en las tierras de cultivo de Mayoc, particularmente tubérculos (y/o raíces) y lechugas con una alta carga del metaloide transferida desde el suelo. Por lo que el **contacto directo de los habitantes de Mayoc con los elementos nocivos, el arsénico entre ellos, habría sido por la vía de ingestión de los alimentos.**

Las precipitaciones pluviales en la zona son típicas de los andes, estacionales, 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 serían los cursos de agua.

En la **evaluación de los niveles de exposición al arsénico en los cuerpos receptores de Mayoc** mediante la revisión de los registros de monitoreo, a lo largo de los años de funcionamiento, paralización, traslado de relaves y cierre del depósito de Mayoc.

Todo esto comprende el periodo **desde fines de 1998 a comienzos del 2006.**

En esta parte se compara todos los resultados de monitoreo indicados, incluyendo los de la inspección especial de **Verificación de condiciones ambientales del Depósito de Relaves Mayoc**, por orden del Ministerio de Energía y Minas (MEM) en el año **2001.**

Inspección cuyo **objetivo primordial** es la **salud de los pobladores de la zona** y en donde se evalúa arsénico en puntos no considerados oficiales, como los domicilios de algunos pobladores o lugares cercanos a ellos.

Los resultados muestran que en el agua para consumo humano, el nivel de As no supera los estándares.

En aire no supera el estándar nacional sectorial, pero en algunos puntos sí supera el valor de la legislación de Ontario, más estricta.

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

En suelos, el arsénico supera en la mayoría de puntos muestreados, los estándares de comparación internacionales.

En la recopilación final de resultados de análisis de arsénico en los cuerpos receptores de Mayoc, del **año 1999 al 2006**, un **cuadro comparativo** que indica los rangos de los valores (mínimo-máximo en todos esos años) se observa que en aguas y aire, los valores cumplen con las normas nacionales. En aire, en algunos puntos se sobrepasa los estándares internacionales, mas no es una constante.

En suelos, en la mayoría de puntos de las diferentes inspecciones, se supera los valores de la normativa internacional.

Dada la importancia del asunto, en la Auditoría Ambiental se realiza -de manera alterna, con fines comparativos y empleando las contramuestras respectivas- el análisis de las muestras de suelos tomadas, mediante los servicios de dos laboratorios - CIMM Perú y Corplab Perú-, acreditados por INDECOPI, que cuentan con los métodos de ensayos acreditados para suelos. Los valores reportados por ambos, son muy similares.

Los contenidos metálicos de **arsénico**, plomo y zinc, se encuentran fuera de rango normal para suelos.

Mediante esta información se puede diagnosticar que los suelos de Mayoc están contaminados por diferentes causas (prolongada actividad minero metalúrgica y la presencia del depósito de relaves) y lo **siguen estando a pesar del retiro de los relaves**.

En **suelos** los valores obtenidos indican que la generalidad de estos en la zona cultivada aguas arriba del depósito de relaves, presentan una concentración anormal por exceso de elementos como As y metales como Pb y Zn.

Según la Agencia de Protección Ambiental de Suecia (*Swedish Environmental Protection Agency*), los suelos con una **concentración total de arsénico** superior a **40 mg kg<sup>-1</sup>**, deben ser considerados como contaminados. Las concentraciones de As total en los alrededores del depósito de Mayoc (camino a la glorieta, chacras y patios de las viviendas) según Golder Associates Perú S.A. en 2004 estaban en un rango de **200 a 1490 mg/kg**, sobrepasando hasta en más de **30 veces los estándares de suelos normales**. Todavía no se tiene delimitado claramente el espacio geográfico que abarcarían los **suelos contaminados** por la actividad minera, en más de treinta años.

***Los suelos contaminados por años, siguen siendo un problema y los pobladores de Mayoc siguen exigiendo un tratamiento adecuado para su recuperación.***

La muestra de suelo correspondiente al suelo del entorno de la Posta Médica de Tamboraque 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 mencionado 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.

El análisis granulométrico de las partículas del **relave de Mayoc** indica que, principalmente tienen un tamaño menor al correspondiente a la malla 200, presente en un 60%. Del análisis químico, se nota un **contenido porcentual de As en el relave de 4,2%**, constituyéndose en la **concentración más elevada después del Fe**.

### **Presencia de arsénico en los habitantes**

En este capítulo se investiga los casos de enfermedades relacionadas a la contaminación por arsénico en los habitantes de Mayoc y zonas aledañas. Las diferentes publicaciones relacionadas se dividen en tres grupos: fiscalizaciones autorizadas por el Estado Peruano, instituciones particulares e instituciones científicas. En una publicación de la Universidad de San Marcos y publicada por la Sociedad Peruana de Dermatología se informa sobre casos de pobladores que presentan características de daño arsenical.

## **6.2 FITORREMIEDIACIÓN de suelos en Mayoc: Propuesta de control de la dispersión del arsénico**

El arsénico disperso por años en la zona en estudio y lugares aledaños ha contaminado el suelo, como se constata en los registros de muestreo en capítulos anteriores.

El suelo tiene gran importancia porque interviene en el ciclo del agua y los ciclos de los elementos y en él tienen lugar gran parte de las transformaciones de la energía y de la materia de los ecosistemas. Además, como su regeneración es muy lenta, el suelo debe considerarse como un recurso no renovable y cada vez más escaso, debido a que está sometido a constantes procesos de degradación y destrucción.

A pesar del retiro de los relaves de Mayoc, los suelos permanecen en las mismas condiciones, por lo que la propuesta de control de la dispersión de arsénico en la zona es la fitorremediación mediante un procedimiento detallado. Se recomienda efectuar experimentos que pondrán de manifiesto si la fitoextracción o la fitoinmovilización es la técnica de remediación más adecuada, en suelos contaminados por diversos metales y metaloides, como es el caso de San Mateo de Huanchor.

En la parte experimental de este procedimiento se ha hecho pruebas de absorción de soluciones acuosas de sales de arsénico en sus dos estados de oxidación, con diferentes plantas, similares a las plantas características de la zona.

En la **primera etapa de la parte experimental** se trabaja con sales de As (III) y se analiza cada semana el avance en la absorción del contaminante por separado en tallo y hojas de cada planta.

Al inicio del experimento se analiza el suelo de cada maceta antes de iniciar el riego ( $T_0$ : tiempo inicial), que también se considera como el Blanco (BK) o contenido de As inicial. Los parámetros analizados en los suelos son pH, Eh, Materia Orgánica y Humedad.

El análisis en las plantas también se realiza al inicio ( $T_0$ , antes del riego) y estas concentraciones se restan de las concentraciones finales y estos resultados vienen a ser el contenido de As que realmente ha absorbido la planta.

Las tablas que relacionan los contenidos de As en las muestras de plantas con los parámetros del suelo (pH, Eh, %MO y %Humedad) dan resultados muy dispares.

Los valores de Eh (382 - 472 mv) corresponden a suelos de carácter oxidante y el rango de pH (6,6-7,6) son favorables para que la especie predominante de As sea el Arseniato o As (V). Puede ser esta la razón por la que las especies no absorbieron el As (III) en mayor proporción.

Llama la atención la falta de repetibilidad en los resultados de As absorbido en plantas consideradas similares, es decir de la misma especie (se pueden considerar una misma planta). Para estudiar la causa de este comportamiento se debe hacer una prospección de plantas y suelos de una misma área y que hayan crecido una muy cerca de la(s) otra(s), como recomienda el protocolo para el trabajo de campo.

En la segunda etapa se cambia las plantas y el estado de oxidación del As, al igual que sólo se llega a analizar hojas de las plantas tratadas. Así mismo, se cambia las técnicas de absorción (por la imposibilidad de conseguir las plantas en maceta, salvo una).

Ante todos los inconvenientes presentados - sobre todo la falta de tiempo - se prueba la técnica de rizofiltración (absorción de As en agua, a través de las raíces de las plantas), aunque sin usar nutrientes.

Se repite la experiencia con el Llantén en la segunda etapa, porque de las 4 plantas de la primera etapa es el llantén (en una de sus muestras) el que absorbe mayor cantidad de As (III) en sus hojas.

Muy cercano al comportamiento del llantén está el Diente de león, con la desventaja que con esta planta no ha habido riego en maceta, análisis de suelos, ni pruebas con soluciones de As en sus dos estados de oxidación.

A pesar de las pocas experiencias en el laboratorio con las plantas en contacto con la solución de As (V), es en estas pruebas donde se obtiene la mayor concentración del contaminante asimilado. Esto puede deberse a las **características químicas similares** del **arseniato** con el **fosfato**, nutriente de las plantas.

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

**7.1.1** Se evalúa los niveles de exposición al arsénico en los cuerpos receptores de Mayoc mediante los registros de monitoreo en diferentes etapas:

- ◇ Los contenidos de **arsénico**, cobre y zinc en AGUAS en las tres estaciones de control, durante las etapas previa, durante y posterior al traslado de relaves, se mantuvieron por debajo de los LMP establecidos en las Clases II y III de la Ley General de Aguas.
- ◇ El monitoreo de AIRE realizado durante la Auditoria Ambiental anterior y posterior al traslado de relaves, permite determinar que los valores de PM10, **arsénico** y plomo, en las tres estaciones de monitoreo, se encuentran por debajo de los niveles máximos permisibles.
- ◇ Los resultados del monitoreo de SUELOS previo a la remoción de relaves, indican que los contenidos metálicos de **arsénico**, cobre, plomo y zinc de todos los puntos, son superiores a los valores de los rangos normales para suelos de la World Health Organization, 2001, Enviromental Health, Ginebra.

Los resultados del monitoreo de suelos, posterior a la remoción de relaves, indican que los contenidos de **arsénico** y zinc registran contenidos variables, algunas muestras indican valores por debajo del rango normal para suelos.

Los resultados del monitoreo de suelos, después de los trabajos de REMOCIÓN DE RELAVES en Abril del 2006, indican que los contenidos de **arsénico** registran contenidos entre 3 y 40 veces, superiores a los valores de los rangos normales para suelos de la World Health Organization, 2001, Enviromental Health, Ginebra. Estos resultados se hallaron en 5 calicatas tomadas en la zona donde estuvo depositado el relave.

**7.1.2** Al evaluar la presencia de arsénico en los habitantes de Mayoc a través de informes científicos detallados, se determina que en el estudio publicado en el año 2005, de 8 casos estudiados, 5 superan el Límite Máximo de Seguridad de depuración de arsénico normado por la OMS (50 µg/L en 24 horas).

Además las lesiones causadas por el arsenicismo pueden ser exacerbadas por la radiación solar y viceversa.

Se concluye que se desconoce el significado de estos hallazgos y sus implicancias en el riesgo de desarrollo y pronóstico de cáncer de piel no melanoma, sin embargo, el trabajo es un primer acercamiento para tratar de encontrar una respuesta a este problema.

**7.1.3** Se propone la FITORREMEDIACIÓN como un procedimiento para reducir la dispersión de arsénico en suelos contaminados de Mayoc, y que puede ser aplicado a cualquier otro ecosistema con características similares. Se describe una propuesta multidisciplinaria para efectuar el procedimiento.

En la parte experimental se llega a determinar la capacidad de absorción de plantas características de la flora aledaña al depósito de relaves de Mayoc.

Del grupo de plantas que se regaron con solución de As (III), el **eucalipto** supera en más de 17 y 5 veces, en hojas y tallos, respectivamente, el contenido inicial del metaloide, en mg/L; absorbiendo sólo 14,3 mg As<sup>III</sup> / kg de hojas y tallo de la planta. El eucalipto es la única especie de la primera etapa, que en sus dos muestras, presenta resultados cercanos en todos los parámetros analizados, como el contenido de As (III) en hojas y tallo secos, y los parámetros analizados en las muestras de suelo.

El Llantén obtiene el valor más grande de As (III) absorbido (LI2 en hojas y total, en la primera etapa). Esta muestra corresponde al suelo con valores de humedad y MO elevados. La información desfavorable es que no hay repetibilidad en este comportamiento en las demás muestras de Llantén.

El **llantén** y **diente de león** absorben sobre los 60 mg As (V) / kg de hojas secas, superando casi 44 y 22 veces, respectivamente, el contenido inicial del metaloide en la planta.

## **7.2 Recomendaciones**

- 7.2.1 Continuar con las pruebas de absorción de As en plantas de Mayoc, específicamente, con As (V) en hojas y tallos.
- 7.2.2 Si fuera el llantén la planta que mejor absorbiera el arsénico en los mismos suelos de Mayoc, en la ex relavera, iniciar un estudio sobre el tratamiento de disposición final de estas plantas contaminadas. Igualmente si fuera cualquiera otra especie.
- 7.2.3 Continuar con el estudio bibliográfico de plantas metalofitas en el Perú.
- 7.2.4 Analizar el contenido de As, Pb, Hg y otros elementos en los productos que cultivan en San Mateo de Huanchor.
- 7.2.5 Aplicar la técnica de fitorremediación en los suelos afectados, sin vegetación y con contenidos elevados de arsénico.
- 7.2.6 Proponer al INRENA la creación del INVENTARIO NACIONAL DE SUELOS CONTAMINADOS y DE PLANTAS EN LUGARES CERCANOS A SUELOS CONTAMINADOS (trabajo conjunto de botánicos y geólogos).
- 7.2.7 Incluir valores límites de concentración de metales tóxicos, en particular de arsénico, para suelos, en las normas legales del sector minero.
- 7.2.8 Revisar el Informe de monitoreo de Plan de Cierre de Mayoc a entregarse el año 2011, para evaluar el estado de los eucaliptos plantados en la zona del ex depósito de relaves y el contenido de As en suelos de la zona y alrededores.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) APHA, AWWA, WPCF - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Versión en español de la 17ª Edición – 1992.
- (2) ArgenBio - Consejo Argentino para la Información y el Desarrollo de la Biotecnología, Programa Por Qué Biotecnología de ArgenBio  
[www.porquebiotecnologia.com.ar](http://www.porquebiotecnologia.com.ar) o [educacion@porquebiotecnologia.com.ar](mailto:educacion@porquebiotecnologia.com.ar)
- (3) Bernal M. P., Clemente R., Walker D.J.; Ecosistemas 16 (2), Mayo 2007 - Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar.
- (4) Besuschio S. C., "Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico", Desarrollo sostenible, Situación ambiental Argentina, Mayo 2009.
- (5) Burriel Martí F. et al., Química Analítica Cualitativa, Paraninfo, España 1992.
- (6) Carbonell Barrachina A. A., Burló Carbonell F. M., Mataix Beneyto J. J., Arsénico en el sistema suelo-planta / Significado ambiental, Universidad de Alicante – Secretaría de Publicaciones, 1995.
- (7) Carranza Noriega R., Medio Ambiente, Universidad Nacional del Callao, Perú, 2001.
- (8) D&E Desarrollo y Ecología SAC, Examen especial para verificar la implementación del Plan de Cierre del depósito de Relaves Mayoc, Minem, Perú, Julio 2006.
- (9) D&E Desarrollo y Ecología SAC, Verificación de Condiciones Ambientales del depósito de Relaves Mayoc, MEM, Perú, 2001.
- (10) DIGESA, "Atención de salud en las localidades de San Mateo de Huanchor" Caso N° 12.471 - Relave de Mayoc; Intoxicaciones por metales pesados. Curso Internacional de Emergencias Toxicológicas – Washington, D.C.; 28 de abril de 2005 - Lima Julio 2007. Dirección General de Salud Ambiental - Ministerio de Salud del Perú.
- (11) El Peruano – D.S. N° 002-2008-MINAM
- (12) Fernández Cirelli A., Tecnologías económicas para la remoción de arsénico – Curso Taller Remoción de arsénico en aguas, Valencia, España, Mayo 2008 - CETA, Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- (13) González I., Muena V., Cisternas M. & Reaman A., Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central - Revista Chilena de Historia Natural 81: 279-291, 2008.

- (14) Higuera P., Oyarzun R., Prospección geoquímica, Tema 4  
[www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema04/Prospeccion\\_geoquimica](http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema04/Prospeccion_geoquimica)
- (15) Kidd P.S., Becerra Castro C., García Lestón M., Monterroso C.; Ecosistemas 16 (2), 26-43, Mayo 2007 - Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L.
- (16) MEM - Dirección de Asuntos Ambientales, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua, Perú, 1993.
- (17) MEM - Dirección de Asuntos Ambientales, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones, Perú, 1993.
- (18) MEM - Guía ambiental para vegetación de áreas disturbadas por la industria minero metalúrgica.
- (19) Minería y Medio Ambiente Nº 4 - Minería y suelo, Instituto de Tecnología Geominera de España (ITGE)
- (20) Minería y Medio Ambiente 8 - Restauración y Remediación del Terreno; Instituto Geológico y Minero de España, ITGE, 2008.
- (21) Morand Enzo E., Osicka, Rosa M., Giménez, María C., Garro Oscar A., Extracción enzimática de arsénico en plantas - Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003. Universidad Nacional del Nordeste, El Chaco, Argentina.
- (22) Nevers Noel de, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Mc. Graw-Hill, México, 1997.
- (23) OEA-ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS, COMISIÓN INTERAMERICANA DE DERECHOS HUMANOS - CASO 12.471 - COMUNIDAD SAN MATEO HUANCHOR, Presentación sobre el fondo; Marcos A. Orellana Senior Attorney, CENTRO PARA EL DERECHO INTERNACIONAL AMBIENTAL (CIEL), Washington DC, 20036 - 1367 Connecticut Avenue, N.W., Suite 300; 29 de junio del 2006.
- (24) Perú Infomine – Infomine Inc. Inteligencia y tecnología minera.  
Ediciones web: Las-minas-del-Peru-top-mining-companies-in- Peru
- (25) Pineda Hernández, R., “*Presencia de hongos micorrízicos arbusculares y contribución de Glomus intraradices en la absorción y translocación de cinc y cobre en girasol (Helianthus annuus L.) crecido en un suelo contaminado con residuos de mina*”, Tesis Doctorado en Ciencias; Área: Biotecnología - Universidad de Colima, México, 2004.

- (26) Ramos W., Galarza C., de Amat F., Pichardo L., Ronceros G., Juárez D., Mayhua A., Anaya R., Hurtado J., Chía H., Guizado D., y Ortega-Loayza A. Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico?- Sociedad Peruana de Dermatología. Dermatol Peru 2006; vol. 16 N° 1:249-253 – Lima Enero-abril 2006.
- (27) Rodier J. Análisis de aguas, Ediciones Omega S.A., España, 2000
- (28) Spiro T., Stigliani W., Química Medioambiental, 2004, 2a. edición
- (29) SVS Ingenieros S.A., Estudio de Impacto Ambiental del depósito de relaves Chinchán y transporte de relaves, Diciembre 2008.
- (30) SVS Ingenieros S.A., Plan de Cierre del depósito de Relaves de Mayoc, Lima – Perú, 2005.
- (31) Swedish Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Suecia), [www.internat.naturvardsverket.se](http://www.internat.naturvardsverket.se)
- (32) Thornton I., Farago M., The geochemistry of Arsenic, OMS, 2000
- (33) Velis Pajuelo L., Estudio de la contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc, Informe de suficiencia para optar el título profesional de Licenciada en Ciencias con mención en Química – Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú 2002.
- (34) Warner Peter, Análisis de los Contaminantes del Aire, Paraninfo, España, 1981.



## ANEXOS

## ANEXO N° 1.1

### DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INTERÉS: MAYOC

Paraje de Mayoc, distrito de San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí- Lima

#### **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.

El depósito de relaves y el caserío Glorieta de Mayoc se encuentran localizados sobre una terraza aluvial en el fondo del valle del río Rímac en una área que presenta un relieve relativamente plano, con una suave pendiente en dirección al río de un 10%.

A la altura de la ubicación del depósito de Mayoc, el valle es profundo, tiene forma en V y sigue la dirección NNE-SSO.

El cauce del río se encuentra en la cota 3 000 msnm, las cimas de los cerros alcanzan los 4 800 msnm y los taludes tienen pendientes que varían entre aproximadamente 27° y 33°. Aguas arriba y aguas debajo de la terraza aluvial, el valle es más estrecho, formando un “callejón” que se amplía ligeramente a manera de embudo a la altura del depósito de relaves Mayoc y de Glorieta de Mayoc.

Los depósitos de relaves Tamboraque N° 1 y 2 descansan sobre una depresión en el macizo rocoso sobre la margen izquierda del río Rímac.

#### **Clima y Meteorología**

Los caracteres climáticos del área corresponden al *subtipo climático frío seco* propio de la zona andina: altitud (<3200 msnm), latitud subtropical, circulación atmosférica, entre otras.

Estas características determinan la presencia de heladas moderadas entre mayo y octubre y precipitaciones entre diciembre y abril, con promedios anuales de 1000 mm. No se cuenta con registros térmicos de la zona pero se estima, sobre la base de los registros meteorológicos que se incluyen en el Anexo del Inventario y Evaluación de los recursos naturales de la Zona del proyecto Marcapomacocha (ONERN, 1975).

Con temperatura media anual de 10°C, humedad relativa de 70% (estación meteorológica de Matucana) y evaporación media anual de 1 200 mm (estación de Canta).

En Mayoc el viento sopla principalmente de SSO hacia el NNE, siguiendo la dirección del valle. Las velocidades varían de calmadas a brisas moderadas (21,0 km/h, estación de Matucana). *Fuente: Plan de Cierre del depósito de relaves de Mayoc, Abril 2005.*

#### **Geología (INGEMMET, 1983)**

En áreas aledañas a Mayoc y Tamboraque afloran rocas volcánicas pertenecientes a la unidad lito-estratigráfica del Grupo Rímac, constituidas principalmente por andesitas, flujos de brecha y tufos andesíticos 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.

#### **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.

## **Hidrografía**

El área del estudio se ubica sobre la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental de los Andes, en la cuenca alta del río Rímac, cuyo origen se encuentra en los deshielos del Nevado Uco, a 5100 msnm, que se alimenta con las precipitaciones en la parte alta de su cuenca colectora y con deshielos de los nevados que existen en ella.

A la altura de los depósitos Tamboraque N° 1 y 2 la cuenca hidrográfica comprende un área de 470,76 km<sup>2</sup>, el régimen del río es irregular y de carácter torrencioso por ser la alimentación de la escorrentía superficial, básicamente de origen pluvial.

Aguas abajo de estos depósitos se ubica el río Aruri (la quebrada Parac en la hoja 24-k del Instituto Geográfico Nacional) que tiene su origen en el Nevado Suerococha.

Su cuenca hidrográfica comprende un área de 135,83 km<sup>2</sup> y similarmente al río Rímac se alimenta de las precipitaciones que caen en la parte alta de su cuenca colectora y con los deshielos de los nevados que existen en ella. Su régimen es irregular y de carácter torrencioso, es decir, similar al del río Rímac.

## **Sismicidad**

Los parajes de Mayoc y Tamboraque se encuentran en una zona de “sismicidad alta” según la clasificación de los sismos por sus efectos en edificaciones y su intensidad, (Normas de diseño sismo resistente del Ministerio de Vivienda y Construcción, 1977).

En la zona pueden presentarse sismos con intensidades iguales o mayores a VIII en la escala de Mercalli Modificada. En el estudio del Cierre de las canchas de relave N° 1 y 2 de la Planta Concentradora Tamboraque se estableció que el sismo máximo creíble sería de magnitud 8,7 en la escala de Richter, con una aceleración horizontal máxima de 0,4 g (Ordóñez, 2004).

## **Áreas de conservación**

De acuerdo al SINANPE - INRENA (Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - Instituto Nacional de Recursos Naturales), el área de influencia del presente estudio no se encuentra en un área de conservación.

## **Zonas Arqueológicas**

El reglamento de Investigaciones Arqueológicas aprobado mediante Resolución Suprema N° 004-2000-ED establece que la Comisión Nacional Técnica de arqueología apruebe el Certificado de Inexistencia de Restos Arqueológicos (CIRA) previamente expedido por la Dirección Ejecutiva del Instituto Nacional de Cultura (INC).

En la zona en estudio no existen restos arqueológicos según la información del INC, según el reglamento de Exploraciones y Excavaciones Arqueológicas (R.S. N° 559-89-ED), sustituido por el reglamento aprobado en el año 2000, arriba mencionado.

## **Ambiente socioeconómico-demográfico**

Se tiene información de los censos nacionales por distritos, en diferentes años, para comparar si ha habido cambios drásticos en el número de habitantes y mejoramiento o deterioro en su condición básica socio-económica de los habitantes de San Mateo.

Los pobladores de Glorieta de Mayoc son un grupo de 21 familias, en su mayoría agricultores subsistentes o subempleados. Los pobladores de Daza son aproximadamente 40 familias, migrantes en su mayoría y algunos comuneros. Tienen como actividad principal el servicio de alimentación a transeúntes de la Carretera Central, servicios de taller mecánico y vulcanizadoras. (Estimación año 2000).

## ANEXO Nº 2.1

### PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO

El suelo es un sistema dinámico conformado por cuatro componentes básicos, materia mineral, materia orgánica (que incluye materia orgánica en diferentes grados de descomposición y microorganismos), agua y gases en proporciones tales que permitan el desarrollo de las plantas superiores.

Los suelos difieren entre sí por sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

#### **PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO**

Las más importantes son su textura, densidad aparente y estructura. Las propiedades físicas del suelo definen la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua y contribuyen a definir su erosionabilidad y capacidad de uso.

##### ***Textura***

La textura general de un suelo depende de las proporciones de partículas de distintos tamaños que lo constituyen. Las partículas del suelo se clasifican como arena, limo y arcilla. Las partículas de arena tienen diámetros entre 2 y 0,05 mm, las de limo entre 0,05 y 0,002 mm, y las de arcilla son menores de 0,002 mm.

La textura del suelo tiene influencia directa en propiedades como la infiltración, la conductividad hidráulica, la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico. No existe una textura óptima que se adapte a todos los propósitos y a todas las plantas debido a que las necesidades requeridas varían enormemente.

Pero un medio con suficiente arena que permita la aereación y evite pérdidas para lograr el crecimiento y desarrollo de la raíz de la planta y, además, la presencia de suficiente arcilla para proveer los nutrientes adecuados y una capacidad de retención del agua, constituirían las condiciones ideales en la mayoría de los casos.

Los suelos con un alto porcentaje de partículas de arcilla (menos de 0,002 mm de diámetro) tienen una capacidad de retención de agua relativamente mayor y muchos nutrientes disponibles para las plantas. Estos suelos son consistentes y duros cuando se secan y pegajosos cuando están mojados. A menudo, tienen drenaje y aereación pobres. Además, algunos suelos arcillosos tienen potencial alto de expansión-contracción que puede ser perjudicial para las raíces de la planta. Los suelos con alto porcentaje de partículas del tamaño de la arena (0,02 a 2,0 mm) tienen una capacidad de retención de agua relativamente baja y una limitada disponibilidad de nutrientes para la planta.

##### ***Densidad*** (real y aparente)

La real corresponde a la densidad media de la fase sólida del suelo, mientras que la aparente es la que puede medirse directamente, esto es, masa por unidad de volumen, siendo éste el volumen total de la muestra, incluyendo los huecos que contenga. Por lo tanto, esta densidad es sistemáticamente menor que la real.

##### ***Estructura***

Depende de los agregados individuales y de la plasticidad del suelo que determinan.

##### ***Porosidad***

Propiedad de presentar huecos, poros o fisuras. Se expresa por el porcentaje de volumen poroso respecto al volumen total de suelo o roca (porosidad *total o bruta*). Además de esta porosidad total, se define como porosidad *útil* la correspondiente a huecos interconectados, es decir, el volumen de huecos susceptibles de ser ocupados por fluidos.

### **Composición mineralógica**

Se determina mediante técnicas microscópicas y Difracción de Rayos X (DRX).

### **Granulometría**

Establece cuantitativamente el tamaño de los granos por tamizado. A menudo es un reflejo de caracteres como porosidad y permeabilidad, comportamiento mecánico, etc.

## **PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO**

Las propiedades químicas del suelo se basan en sus componentes inorgánicos y orgánicos y definen la ciencia de la Química de suelos.

### Componentes inorgánicos

Constituyen la parte principal de la fracción sólida de la gran mayoría de suelos. Pueden variar de menos de 10% (suelos orgánicos, pantanosos) a 99,5% (superficie de suelos en regiones muy secas). Entre estos componentes están:

- **Minerales primarios:** Silicatos, óxidos y carbonatos. También sulfatos y fosfatos en menor escala.
- **Minerales secundarios,** producto de meteorización geoquímica (superficial) y edafológica (más profunda) que sufren los primarios. La gran mayoría de partículas de arcillas son de esta clase. Dos grandes grupos: silicatos y óxidos.

### Componentes orgánicos

Incluyen residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición y también una gran comunidad de seres vivos. La parte más estable se llama **humus**.

Comúnmente de color oscuro. Los **ácidos húmicos** presentan una heterogeneidad física y química muy alta, debida a la diversidad de sustratos y de procesos que intervienen en su génesis. La caracterización de los mismos se ha llevado a cabo mediante el análisis de su composición elemental y del contenido en grupos funcionales, utilizando además técnicas de espectroscopía (absorción visible, infrarroja y fluorescencia) y titulaciones potenciométricas.

La fase orgánica del suelo regula los procesos químicos, influye en las características físicas y es el centro de casi todas las actividades biológicas.

La materia orgánica del suelo interviene en procesos químicos como:

1. Suministro de macro (N, P, S) y micronutrientes para las plantas.
2. Estabilización del pH del suelo.
3. Capacidad de intercambio catiónica del suelo, muy valiosa para los arenosos.
4. Regular procesos de quelatación móviles importantes en procesos edafogénicos.
5. Regular procesos de volatilización y sorción.
6. Afecta propiedades físicas (estructura del suelo, uso eficiente del agua) y biológicas que pueden mejorar o perjudicar a las plantas.

Las propiedades químicas más importantes son la capacidad de intercambio catiónico, el grado de acidez o alcalinidad y la concentración de sales en el perfil. Las propiedades químicas de los suelos están, sobre todo, asociadas con su capacidad de uso con fines agrícolas.

### **pH del suelo**

La solución del suelo es simplemente agua de suelo en la que se disuelven las formas iónicas de los nutrientes de la planta. Una propiedad importante de la solución del suelo es su reacción, es decir, si es ácida, neutra o alcalina. El pH del suelo puede influir en la absorción de nutrientes y el crecimiento de las plantas de dos maneras:

- 1) a través del efecto directo del ion hidrógeno; o
- 2) indirectamente, a través de su influencia para disponer de nutrientes y la presencia de iones tóxicos.

En la mayoría de los suelos, este último efecto tiene gran significado. A pesar que con valores de pH en el extremo ácido se puede demostrar el efecto tóxico directo del ion hidrógeno, la mayoría de plantas tiene capacidad para tolerar un rango amplio en la concentración de este ion con tal que se mantenga un balance apropiado de los otros elementos. Desafortunadamente, la disponibilidad de varios de los nutrientes esenciales es afectada drásticamente por el pH del suelo, así como la solubilidad de ciertos elementos que son tóxicos para el crecimiento de las plantas.

Varios elementos esenciales tienden a ser menos aprovechables a medida de que se eleva el pH de 5,0 a 7,5 u 8,0. El hierro, manganeso y zinc son buenos ejemplos. Por otro lado, el molibdeno es afectado de manera contraria, siendo mayor en niveles mayores de pH. El fósforo nunca es fácilmente soluble en el suelo pero parece ser adsorbido con menor tenacidad en un rango de pH que se centre alrededor de 6,5. La disponibilidad de fósforo disminuye a medida que el pH se incrementa a partir de 6,5 y luego se incrementa en niveles de pH sobre 8,5. Generalmente, la disponibilidad de nitrógeno es más alta en suelos con un pH en el rango de 6 a 8 y luego decrece en el rango de 8 a 9. La disponibilidad de N y P decrece en pH inferior a 6.

En valores de pH por debajo de 5,0, el aluminio, el hierro y el manganeso son frecuentemente solubles en cantidades suficientes para ser tóxicos para el crecimiento de algunas plantas. En valores de pH muy altos, el ion bicarbonato a veces se presenta en cantidades suficientes para interferir con la captación normal de otros iones, y de esta manera es perjudicial para el óptimo crecimiento de las plantas.

Las poblaciones y procesos microbianos también están influenciados por el pH. En valores de pH del suelo por debajo de 5,5, los hongos son más activos, pero en valores de pH de 6,0 o más, los actinomicetos y las bacterias tienen mucha mayor presencia. El efecto en las poblaciones de organismos, a su vez, influye en los procesos microbianos que son importantes en el ciclaje de nutrientes, tales como la nitrificación, la mineralización de materia orgánica y la fijación de nitrógeno.

La alternativa más común para incrementar el pH de los suelos ácidos es a través de la adición de cal finamente molida. Los valores de aplicación se basan en pruebas de suelo específicas que determinan la necesidad de cal y se asocian con la capacidad tampón del suelo. Si el pH del suelo es altamente alcalino ( $\text{pH} > 9$ ), el suelo debe ser tratado con azufre elemental.

Este azufre elemental se convierte en ácido sulfúrico en suelos húmedos y tibios por acción de ciertas bacterias (por ejemplo *Thiobacillus*). Los análisis de suelo se utilizan para determinar los porcentajes de aplicación de azufre y la existencia de pirita en capas inferiores a la superficie del suelo debe ser tomada en consideración. En las secciones sobre muestreo y enmiendas de suelo se proporciona mayor información sobre los procesos con la adición de cal y de azufre.

### ***Sales solubles***

Los suelos salinos son característicos de zonas áridas y semiáridas. Estos suelos están asociados a climas en los que la evapotranspiración anual excede ampliamente la precipitación pluvial anual; por lo tanto, en condiciones normales, el agua no percola a través del perfil. El resultado es que, a pesar que la falta de agua reduce la intensidad de la meteorización del mineral del suelo, los productos de ésta, por ejemplo, las sales, tienden a acumularse en el suelo.

Debido a que el agua es el vector para las sales, la acumulación de éstas en el suelo comúnmente refleja el relieve y las condiciones geomorfológicas del área.

Existe riesgo de salinidad cuando hay suficiente sal soluble en el suelo para interferir con el crecimiento de la vegetación deseada. El mayor efecto adverso de la salinidad es la reducción de la disponibilidad de agua para las plantas.

En resumen, esto se produce debido a que la presencia de sal en el agua incrementa el esfuerzo que la planta debe hacer para extraer agua de la solución suelo. Este esfuerzo se conoce como el potencial osmótico y es adicional al trabajo requerido por la planta para extraer agua de una solución de suelo no-salina (el potencial mátrico). La suma de ambos potenciales, osmótico más mátrico, se llama potencial del agua del suelo. Las especies de plantas tienen diferentes habilidades para hacer ajustes osmóticos con el fin de mantener una gradiente constante de potencial de agua entre la planta y la solución de suelo. Las plantas que son capaces de realizar los cambios fisiológicos asociados con estos ajustes son las plantas consideradas tolerantes a la sal.

Las plantas afectadas por la salinidad no muestran síntomas distintivos. El efecto más común de exceso de salinidad es una reducción general o atrofia del crecimiento de la planta. Bajo condiciones severas, las hojas de las plantas podrían tener un color púrpura, verde oscuro y una apariencia cerosa. El daño por salinidad es mayor durante la germinación y el establecimiento inicial de la semilla. A niveles de salinidad bajos a moderados, la fertilización, en grado limitado, puede disminuir los efectos adversos de la salinidad. Al mismo tiempo, algunas formas de fertilizante (por ejemplo la mayoría de fertilizantes inorgánicos de N y sales de cloruro de K) tienen un índice de sal relativamente alto y podría agravar el problema de la salinidad. Las alternativas más comunes para mitigar los problemas de la salinidad son la adición de materia orgánica al suelo para mejorar la infiltración y lixiviación natural, el lavaje de las sales fuera de la zona de la raíz y la plantación de especies tolerantes a las sales. La lixiviación de las sales sólo ocurrirá si el suelo posee un drenaje adecuado.

#### ***Potencial redox***

Expresa la tendencia del suelo a oxidar o a reducir. Está relacionado con la composición mineralógica y con la presencia de materia orgánica. La tendencia de los minerales del suelo hacia su oxidación o su reducción son los responsables de la tendencia general del suelo. Se expresa mediante el Eh, que mide este potencial en voltios, expresando la disponibilidad de electrones, de forma que a mayor potencial, mayor poder oxidante.

#### ***Capacidad de intercambio***

Propiedad por la cual aniones o cationes del agua pueden intercambiarse con los aniones o cationes contenidos en los minerales del suelo con que está en contacto. Se determina mediante un procedimiento estándar, que permite conocer este parámetro, que se expresa en miliequivalentes por gramo (meq/g) (capacidad alta) o meq/100g (capacidades normales en el suelo).

Análisis químico.- puede incluir una gran variedad de apartados, y puede llevarse a cabo mediante técnicas muy variadas, tanto clásicas como instrumentales. Los tipos de análisis químicos más frecuentes son:

#### ***Materia orgánica (MO)***

El contenido de materia orgánica se determina por el método de oxidación del carbono de la materia orgánica por la combinación del dicromato de potasio y el ácido sulfúrico (Walkley-Black, 1976). Se toma 10 g de suelo muestreado, se trata con 5 ml de dicromato de potasio 1N y con el doble de ácido sulfúrico concentrado. Después de media hora de reposo se añaden 100 mL de agua, 5 mL de ácido fosfórico y 6 gotas de fenilamina, para titular con solución sulfato ferroso.

### ***Análisis geoquímico total***

Consiste en establecer su composición de acuerdo con los criterios del análisis geoquímico de rocas, es decir, estableciendo el **contenido porcentual en los elementos mayores expresados como óxidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>...)**, en elementos menores, que también se expresan como óxidos (MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), y el contenido en elementos trazas (expresados en partes por millón [ppm] o partes por billón [ppb]) que se consideren de interés para nuestro caso concreto. Una de las técnicas más empleadas, por su bajo costo por elemento, es la espectrometría de plasma ICP. Mayor precisión ofrece la espectrometría de absorción atómica, a mayor precio.

### ***Análisis del agua contenida en el suelo***

A menudo es un dato de gran interés para estudiar las condiciones de equilibrio entre agua y suelo, incluyendo el potencial de paso de los diversos cationes, entre ellos los metales pesados, del suelo a la fase líquida.

Un problema importante suele ser la captación de esta agua del suelo, que suele resolverse mediante unas cápsulas de cerámica porosa. Estas se entierran durante un tiempo en el suelo hasta que entra en las mismas una cierta cantidad de agua. Una vez captada, el tipo de análisis a realizar será variable en función del problema planteado.

**Otros análisis** pueden ser tan variados como nuestras necesidades. Puede ser necesario detectar contaminantes orgánicos específicos en el suelo, para lo que se emplearán técnicas instrumentales específicas tales como la cromatografía o colorimetría.

### ***Conductividad eléctrica del suelo***

La conductividad eléctrica del suelo se determina para medir la salinidad del suelo.

Se toma una relación suelo:agua (1:1) utilizando 100 g de suelo al cual se agrega 100 mL de agua destilada, la suspensión suelo-agua se agita por una hora a 25 °C, se deja reposar por 15 min. Con un conductímetro calibrado se registra la lectura correspondiente.

## **PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO**

Muchas de las transformaciones que ocurren durante el ciclaje de nutrientes son realizadas principal o totalmente por microorganismos. De hecho, si no fuera por la actividad de las bacterias y hongos, muchos ciclos de elementos serían alterados drásticamente y se reduciría la productividad de los ecosistemas.

La comunidad microbiana del suelo en los sistemas ecológicos maduros comprende un complejo de organismos altamente interrelacionados con características igualmente complejas de ciclo trófico y de vida. Este sistema microbiano está estrechamente asociado con la comunidad de plantas y es afectado negativamente cuando esta última es disturbada. Numerosos tipos de macro y microfauna se alimentan de la materia orgánica, cambiando su composición química y reduciendo su tamaño. Bacterias y hongos saprofitos alteran más química y físicamente la materia orgánica, reduciendo eventualmente la porción más resistente en humus y convirtiendo el restante en su biomasa viviente, CO<sub>2</sub> y varios componentes solubles liberados en la matriz de los suelos.

La microfauna (protozoarios, amebas, nemátodos y microartrópodos) y depredadores de la macrofauna se alimentan de los saprofitos, **hongos micorrizales** y de cada uno de ellos, incrementando la complejidad de la red alimenticia.

Los hongos micorrizales existen en asociación mutualista con las raíces de las plantas, utilizando exudados para su abastecimiento de energía y proporcionando a la planta huésped cantidades mayores de agua y nutrientes del suelo, especialmente P.

Entre ciertas bacterias simbióticas (por ejemplo *Rhizobium*) y plantas también se establece otra relación mutualista importante. La bacteria forma nódulos en las raíces de las legumbres y fija el N gaseoso, que luego será disponible para la planta.

La estructura compleja del subsistema desintegrador es un producto de sucesión tal como lo es la comunidad de plantas. Esta se desarrolla progresivamente a través del tiempo en respuesta a la dinámica de las variables bióticas y abióticas del sitio. Las rizosferas de las comunidades de plantas en crecimiento se convierten en centros para procesos, menos en la descomposición de materia orgánica.

Estos incluyen la fijación del nitrógeno, la quelación y enlaces de metales, la transferencia de material entre las plantas a través de las hifas de la micorriza y la creación y mantenimiento de la estructura del suelo mediante la producción de componentes húmicos y polisacáridos. Ya que la planta y el subsistema desintegrador son componentes estrechamente vinculados de una misma comunidad, la alteración de uno afectará al otro.

Una reducción significativa en la producción primaria privará al sistema bajo tierra de su fuente de energía. Surgirán respuestas inmediatas en aquellas poblaciones vinculadas más directamente a las plantas por la energía, los hongos micorrizales y otros organismos dependientes de los exudados de la raíz.

Estrictos en su abastecimiento de energía, estos hongos son reemplazados por los saprofitos o continúan en vida latente. Los exudados de las raíces, junto con las porciones más solubles de humus proporcionan el abastecimiento más fácilmente aprovechable de energía para los desintegradores.

La reducción del abastecimiento ocasiona la disminución correspondiente en la productividad total bajo tierra. Los depredadores que se alimentan principalmente de hongos micorrizales o de depredadores micorrizales, deben encontrar fuentes alimenticias adicionales, con lo cual se reduce la complejidad trófica y se incrementa la competencia. La reducción de una fuente de alimentos ocasiona una disminución de consumidores.

De la discusión anterior debe ser evidente que las alteraciones de una comunidad de plantas afectarán adversamente el funcionamiento del sistema subterráneo. Las graves perturbaciones que afectan a la comunidad de plantas y alteran físicamente el suelo pueden ocasionar la eliminación total de la población microbiana o la desorganización de la función y estructura microbiana.

Bajo estas severas condiciones sería muy difícil restablecer una comunidad de plantas erradicada sin restaurar el subsistema microbiano o proporcionando una fuente de nutrientes fácilmente aprovechable para mantener el crecimiento de la planta, mientras la comunidad microbiana recoloniza el sitio.

La mejor manera para restablecer una comunidad microbiana en el suelo es aplicar una capa superficial de suelo al sitio disturbado que contenga una población viable y diversa de microbios.

Es esencial que la población microbiana tenga una fuente adecuada de energía (carbón) para que funcione apropiadamente, y ello requerirá la adición de materia orgánica y una cantidad de nitrógeno inorgánico para satisfacer sus necesidades nutritivas y energéticas. Otras fuentes microbianas incluyen el estiércol que podría ser aplicado para proporcionar un inóculo del cual se puede originar una población microbiana.

## ANEXO Nº 2.2

### QUÍMICA DEL ARSÉNICO (A)

#### 2.1.1 El elemento

Por la posición que ocupa el arsénico en el grupo V-b 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), presenta el fenómeno de alotropía.

Se ha descrito cuatro formas alotrópicas del arsénico: metálica, gris, parda y amarilla. La más importante es la metálica, llamada también arsénico- $\alpha$ . 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 en aire húmedo oxidándose a  $\text{As}_2\text{O}_3$  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.

#### Compuestos de arsénico: As (-3), As (III) y As (V)

##### As (-III)

El compuesto más importante, analíticamente, del As (-III) es la arsina,  $\text{AsH}_3$ . 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.

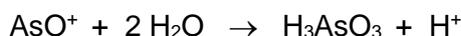
##### As (III)

Este grado de oxidación origina el trióxido,  $\text{As}_2\text{O}_3$ , los arsenitos y el catión  $\text{AsO}^+$  (frecuentemente formulado como  $\text{As}^{3+}$ ), todos ellos de gran interés analítico y toxicológico.

**Comportamiento ácido-base.**- En medio ácido sus compuestos solubles originan el catión  $\text{AsO}^+$  (Diagrama Nº 2.1).

Es dudosa la existencia del catión  $\text{As}^{3+}$ , 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  $\text{AsO}^+$  se transforma en el ácido ortoarsenioso  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  muy débil ( $\text{pK}_{\text{A}1} \approx 10$ ),



que coexiste, en concentraciones elevadas de As(III), con el precipitado vítreo  $\text{As}_2\text{O}_3$ .



Dada la alta solubilidad de este precipitado ( $S = 0,2M$ ), el diagrama log C-pH se ha realizado, en este caso, para una concentración total de 0,1 M, de As(III), 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 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  $AsO_2^-$ .

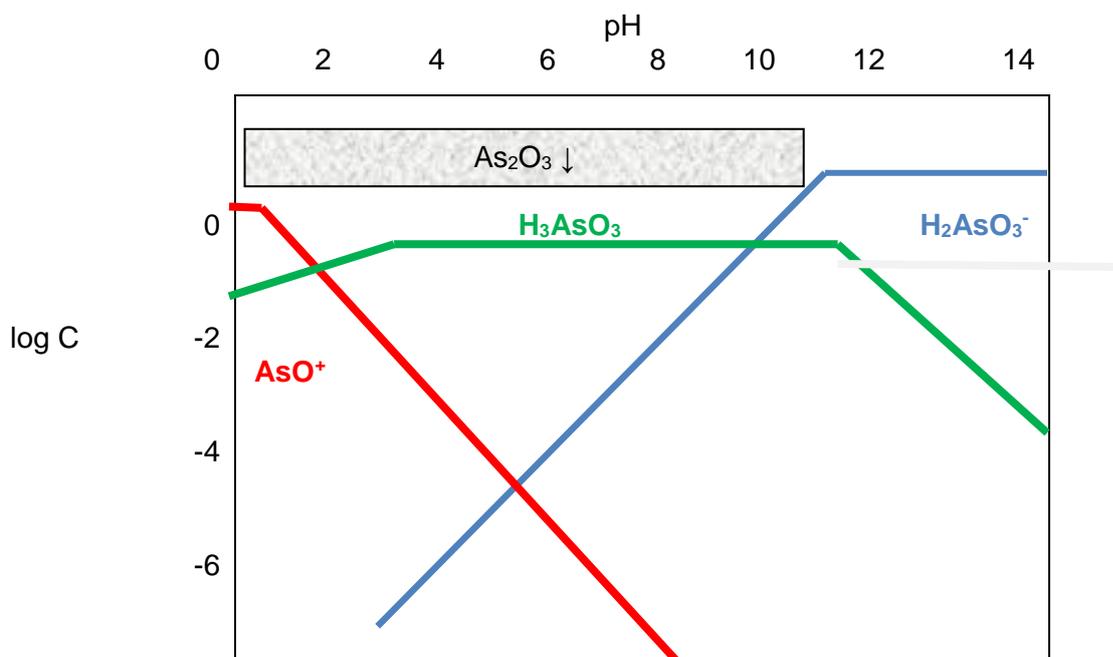


Diagrama Nº 2.1: Log C – pH del As (III); C = 0,1 M

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. 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.

### As(V)

En este estado de oxidación, la relación carga/radio del probable catión  $As^{5+}$  sería tan elevada que no es posible su existencia en medio acuoso. Se describen los cationes menos ácidos  $AsO^{3+}$  y  $AsO^{2+}$ , que sólo existen en débil concentración. 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 dissociado. Al disminuir la acidez van apareciendo, sucesivamente, los distintos aniones del ácido,  $H_2AsO_4^-$ ,  $HAsO_4^{2-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ , incoloros.

El  $H_3AsO_4$  es un poco menos fuerte que el  $H_3PO_4$ . El  $AsO_4^{3-}$  es una base relativamente fuerte (Ver Diagrama Nº 2.2).

**Compuestos.-** El pentóxido de arsénico,  $\text{As}_2\text{O}_5$ , obtenido por deshidratación del ácido ortoarsénico, es un sólido blanco, amorfo, higroscópico y soluble fácilmente en el agua (diferencia con el óxido arsenioso,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ).



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.

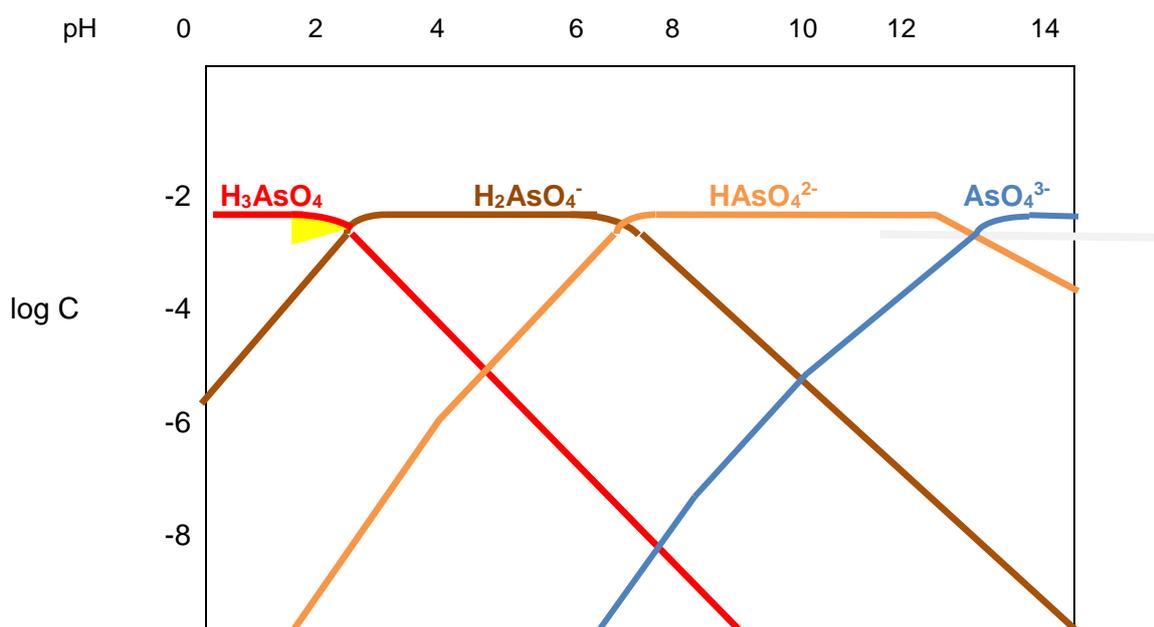


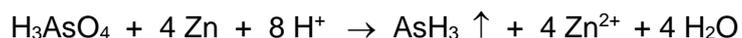
Diagrama Nº 2.2: Log C – pH del As (V); C =  $10^{-2}$  M

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

### Propiedades óxido-reductoras

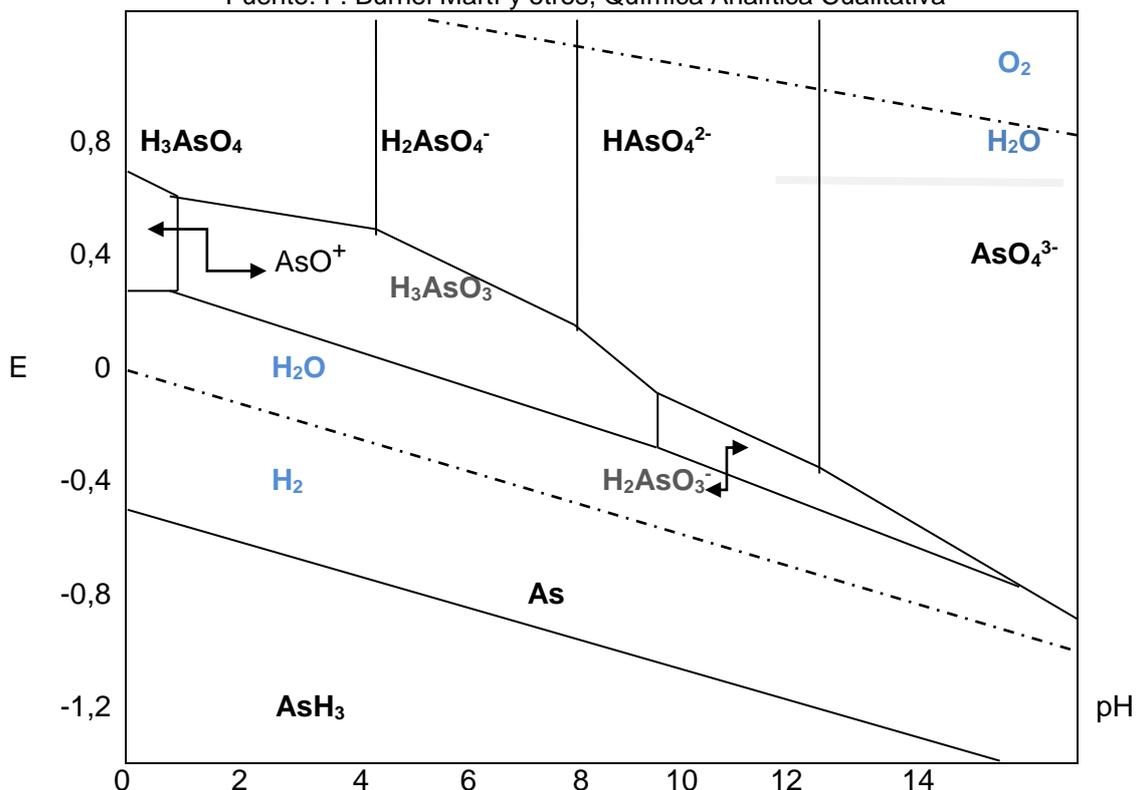
El **Diagrama Nº 2.3**, E-pH para el arsénico representa las propiedades óxido reductoras para los diferentes compuestos del arsénico.

En la concentración a la que está realizado el diagrama ( $10^{-2}$  M) no se forma la especie sólida  $\text{As}_2\text{O}_3$  ni predomina la forma catiónica de arsénico (V),  $\text{AsO}_2^+$ .  $\text{AsH}_3$ , es muy reductora en todo el margen de pH; sólo puede ser obtenida a partir de estados de oxidación superiores, con reductores fuertes (Zn, Al, etc.).



**Diagrama N° 2.3: E - pH de Arsénico; C = 10<sup>-2</sup> M.**

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



El sistema As(III)/As presenta un potencial decreciente al aumentar el pH y siempre superior al del sistema H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>, 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 - 0,7V en medio alcalino: por tanto este sistema se comporta como oxidante en medio ácido y fundamentalmente como reductor en medio neutro o alcalino.

## Compuestos Orgánicos

El arsénico está presente en numerosos compuestos de carácter orgánico, debido a la elevada estabilidad del enlace carbono-arsénico bajo las condiciones medioambientales normales (pH y potencial redox). A consecuencia de la actividad biológica, se producen compuestos metilados como **di** y **trimetilarsina**. Estas especies tras una oxidación, se transforman en los **ácidos metilarsónico** y **dimetilarsónico**, compuestos que forman sales solubles con los metales alcalinos. Mediante una reducción estos ácidos pueden volver a su forma primitiva de arsinas. Cabe mencionar que se ha encontrado en organismos marinos compuestos como la **arsenobetaina** y la **arsenocolina**. Las formas solubles como ácidos metil arsónico [MMA] y dimetil arsínico [DMA] son fuertemente tóxicas. En la Tabla Nº 2.1 se da una relación de compuestos organo-arsenicales.

**Tabla Nº 2.1.- Nomenclatura de compuestos orgánicos de As (WHO, 1981)**

Nombre	Fórmula
ácido metilarsínico, metanoarsónico	$\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$
ácido dimetilarsónico, <b>ácido cacodílico</b>	<b><math>(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})</math></b>
óxido de trimetilarsina	$(\text{CH}_3)_3\text{AsO}$
metilarsina	$\text{CH}_3\text{AsH}_2$
dimetilarsina	$(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$
trimetilarsina	$(\text{CH}_3)_3\text{As}$
ácido p-aminobenceno-arsónico, <b>ácido arsanílico</b>	$\text{H}_2\text{N} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{AsO}(\text{OH})_2$
ácido p-nitrofenilarsónico, <b>ácido 4-nitrofenilarsónico</b>	$\text{O}_2\text{N} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{AsO}(\text{OH})_2$
arsenobetaina	$(\text{CH}_3)_3\text{As} + \text{CH}_2\text{COOH}$
arsenocolina	$(\text{CH}_3)_3\text{As} + \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
dialquilcloroarsina	$\text{R}_2\text{AsCl}$
alquildicloroarsina	$\text{R AsCl}_2$

## QUÍMICA DEL ARSÉNICO EN SUELOS (B)

### Fenómenos de adsorción en el suelo

La persistencia del As en suelo se controla por la capacidad de adsorción del mismo.

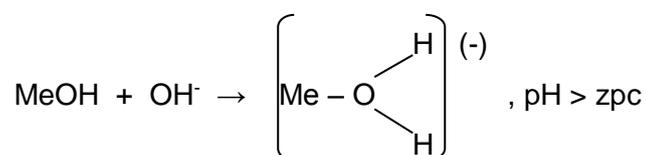
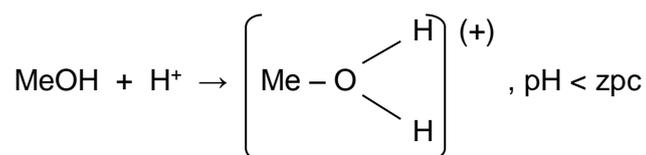
#### **Adsorción por óxidos e hidróxidos**

En los suelos existe una gran variedad de óxidos e hidróxidos, desde los compuestos bien cristalizados hasta los amorfos. La capacidad de adsorción de las formas cristalinas es casi nula en las bases débiles. Los óxidos e hidróxidos amorfos pueden presentar cargas positivas, como por ejemplo  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ . Esto supone la adsorción de aniones. La capacidad de intercambio aniónico de las arcillas se debe entre otros factores a la presencia de estos hidróxidos en la superficie.

Mediante el **mecanismo no específico** la superficie de estos compuestos se carga debido a la adsorción o cesión de  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  que son los iones determinantes del potencial.

Por lo tanto, la carga es función del pH y del **punto isoeléctrico (pi)** de cada óxido e hidróxido. El **punto de carga cero (zpc, zero point charge)** es el que el valor del pH es tal que se adsorben igual número de protones que de hidroxilos.

Se propone el siguiente modelo de disociación anfótera:

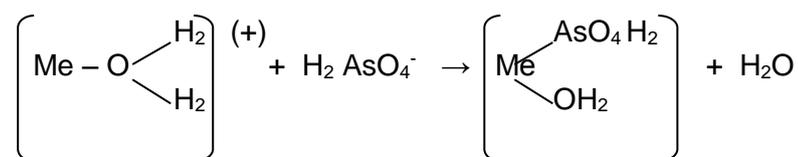


Consecuentemente, los óxidos e hidróxidos adsorben en su superficie cationes o aniones (según el pH del medio) para compensar su exceso de carga. En el caso del **mecanismo específico** los iones se unen por enlaces covalentes tanto superficialmente como dentro de la estructura de coordinación del metal, dando un compuesto de adsorción más estable.

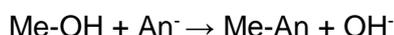
La adsorción del ión arseniato de la disolución del suelo se considera que, tanto en un mecanismo como en otro, es función de las características del óxido y del pH del medio.

Se pueden proponer las siguientes posibilidades para el mecanismo específico:

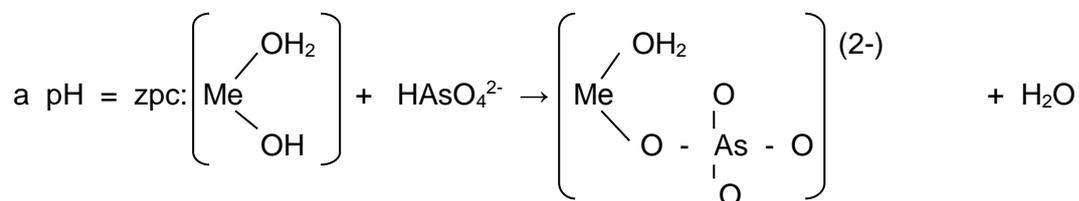
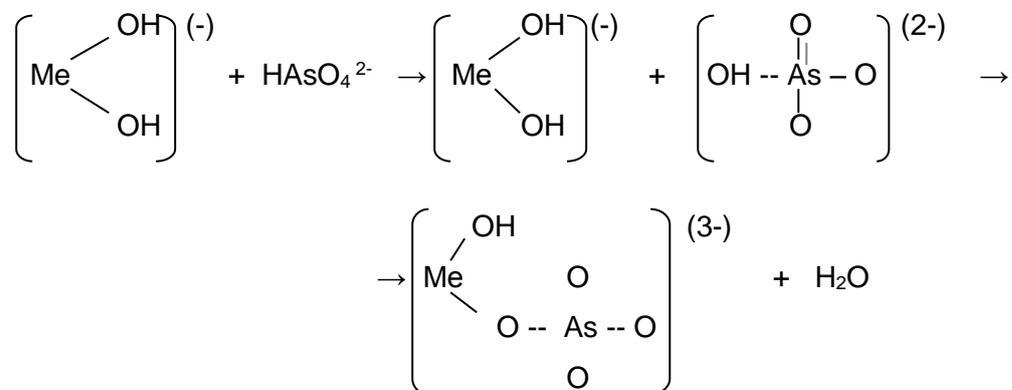
a  $\text{pH} < \text{zpc}$  y si la acidez es suficiente:



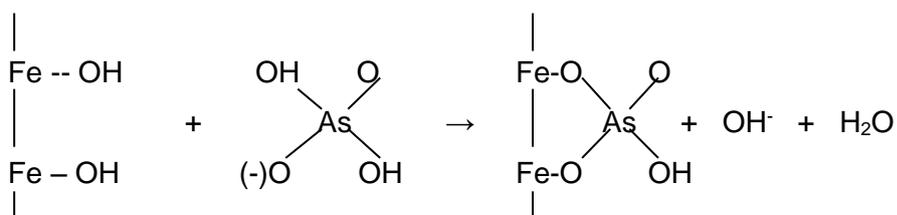
Para el mecanismo no específico es una simple retención superficial:



A pH > zpc y si la basicidad es suficiente en la disolución y predomina el  $\text{HAsO}_4^{2-}$  sobre el  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ .



El arseniato adsorbido por el mecanismo no específico, puede reaccionar a su vez con otros grupos  $\text{OH}^-$  o  $\text{H}_2\text{O}^-$  coordinados al mismo metal y a otro próximo. En este último caso (que es más frecuente que el mononuclear) la molécula de arseniato adsorbida se denomina complejo superficial binuclear: esta reacción la podemos esquematizar en el caso de un hidróxido de Fe de la siguiente forma:



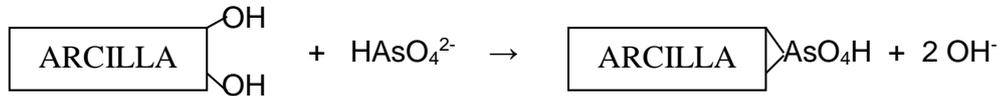
Se observa además, cómo un aumento del pH desplaza el equilibrio hacia la desorción del arseniato. El mecanismo específico de adsorción, como ya se ha visto, supone una protonación del hidroxilo y por tanto, se da en condiciones de pH bajo; este proceso es extremadamente dependiente del pH, por lo que es el mecanismo más frecuente en suelos ácidos, ricos en óxidos e hidróxidos de Fe y Al.

La adsorción de As(III), arsenito, está controlada fundamentalmente por la cantidad de óxidos de hierro existente y por el Eh del suelo. Por tanto, esta afirmación indicaría que los mecanismos descritos en este apartado podrían perfectamente ser los responsables en un elevado porcentaje de los procesos de retención o adsorción del arsenito en los suelos estudiados. Estos hechos han sido confirmados por distintos trabajos que indican la elevada afinidad de diversos herbicidas arsenicales, del fosfato y del arseniato por los óxidos de hierro (baja afinidad por los óxidos de aluminio).

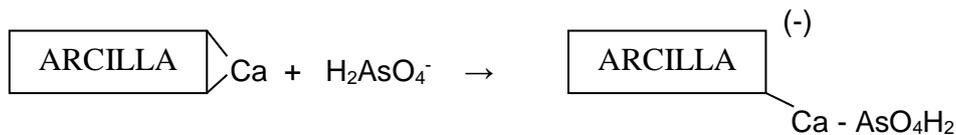
### Adsorción por arcillas

Se ha propuesto los siguientes mecanismos:

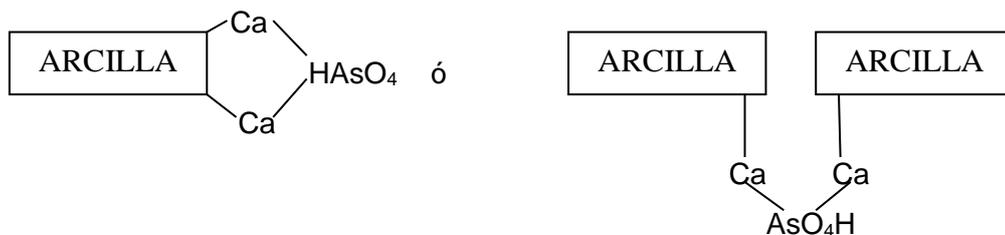
1.- Reemplazo de grupos OH<sup>-</sup> por los aniones arseniato en la superficie de la arcilla, aumentando la fijación cuanto mayor sea la acidez y la capacidad de saturación de la misma,



2.- Fijación a la arcilla por medio de cationes adsorbidos a ella, los cuales actúan como puente con los arseniatos. Los cationes más frecuentes son Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> y Fe<sup>3+</sup>



También puede ser:



Cuando una arcilla contiene calcio adsorbido, el porcentaje de arseniato que, en teoría, se fija es superior sin llegar a alcanzar la precipitación del arseniato de calcio.

Si la arcilla contiene Ca<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup> adsorbidos, la fijación del anión arseniato se verificaría primero, probablemente, por intercambio del calcio.

3.- También puede ocurrir un bloqueo eventual de los iones arseniato adsorbidos sobre las superficies internas, atrapados entre sus unidades estructurales cuando la distancia entre éstas se reduce a valores inferiores a 10 Å. La hidratación de estas arcillas podría liberar iones arseniato. Las arcillas del tipo de la caolinita, en la que la distancia entre unidades estructurales es pequeña (de 3 a 7 Å) no presenta esa posibilidad, pero sí las del grupo de la montmorillonita, ya que sus unidades pueden comprimirse o expandirse según las condiciones de desecación y humectación del medio. Se indica que existen sedimentos con elevados contenidos de arcilla, los cuales debido a su ilimitada capacidad para adsorber fosfatos y arseniatos podrían funcionar o actuar a modo de "sumideros" de arseniato, es decir, serían como enormes almacenes de arsénico en los cuales el contaminante quedaría confinado de forma prácticamente irreversible.

### Adsorción sobre carbonatos

La etapa inicial de este proceso de precipitación se considera que es un fenómeno de adsorción que depende de la extensión de la superficie expuesta por el CaCO<sub>3</sub> y por la concentración de arseniato en la disolución. El carbonato cálcico se encuentra en los suelos a pH neutro o superior, y por tanto, es en este rango de pH en el que se produce la reacción con los arseniatos. Se ha visto que los lugares reactivos para la adsorción en la calcita son los Ca<sup>2+</sup> superficiales. Si se supone que a un suelo rico en CaCO<sub>3</sub> se le añade una forma soluble de As, puede ocurrir:



El compuesto formado es insoluble pero puede convertirse en compuestos más o menos insolubles. Si las condiciones del suelo lo permiten pueden transformarse en formas más insolubles. Esta retrogradación puede ocurrir incluso en suelos ácidos encalados.

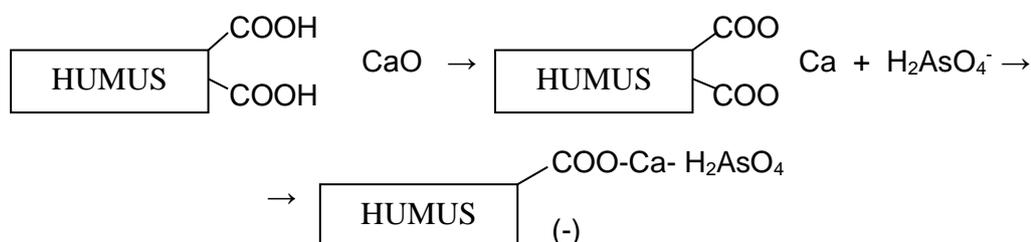
### **Adsorción sobre materia orgánica**

La descomposición del humus (Ver 2.3.1) produce coloides, que son los responsables que la materia orgánica del suelo presente más cargas negativas que positivas.

Este hecho les permite absorber iones  $\text{H}^+$  y cationes metálicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) e intercambiarlos en todo momento de forma reversible; debido a esto, los coloides también reciben el nombre de complejo absorbente.

Las funciones ácido permiten que las moléculas orgánicas puedan ser adsorbidas por interacciones iónicas o ión-dipolo.

En suelos neutros o poco alcalinos, cuando el humus se encuentra como humato de calcio, tiene lugar:



El carácter ácido del humus origina combinaciones cálcicas, las cuales ejercen una influencia en la fijación del arseniato que en este estado puede considerarse como fácilmente disponible.

Por otro lado, cuando el humus se fija en la arcilla puede desplazar a los compuestos que están adsorbidos sobre ella provocando una solubilización del As.

Es evidente que la relación entre la cantidad de arseniato en los sitios de intercambio y en la disolución del suelo, expresa la capacidad de ese suelo para proveer As a las plantas. Por ello, en suelos con baja capacidad de adsorción, la concentración en la disolución del suelo decrecerá rápidamente, aunque hubiera sido alta originalmente; cuando las plantas crecen en este suelo, mientras que no ocurrirá cambio sustancial cuando exista un "pool lábil" de tamaño considerable.

Aunque estos mecanismos anteriores son potencialmente factibles, en trabajos sobre adsorción de herbicidas arsenicales, fosfato y arseniato, se indica que existe una relativa independencia entre las cantidades adsorbidas de estas especies y el contenido de materia orgánica de los suelos de trabajo.

*Debido a la enorme complejidad del denominado sistema suelo, se ha de tener en cuenta que probablemente haya más de un centro de adsorción, es decir, habrá más de un tipo de materiales que intervengan en este proceso de retención.*

## ANEXO Nº 2.3

### MICROORGANISMOS EN LOS SUELOS

Muestreos realizados por el investigador suizo A. Stöckli en tierras de cultivo con una capa húmica estable han dado como resultado el siguiente promedio por m<sup>2</sup> de seres vivos en su interior: 4 billones de bacterias y hongos; 500.000 flagelados; 200.000 ácaros; 100.000 colémbolos; 80.000 Enchytracide; 80 lombrices de tierra.

Aparte de estos componentes biológicos, en el suelo se produce la acumulación de los restos de estos seres vivos y de otros seres vivos (plantas y animales) que viven sobre su superficie, y cuya descomposición da origen a lo que se denomina humus. En la composición del humus se encuentra un complejo de macromoléculas en estado coloidal constituido por proteínas, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, etc., en constante estado de degradación y síntesis. El humus abarca un conjunto de sustancias de origen muy diverso, que desarrollan un papel de importancia capital en la fertilidad, conservación y presencia de vida en los suelos. A su vez, la descomposición del humus en mayor o menor grado, produce una serie de productos coloidales que, en unión con los minerales arcillosos, originan los complejos organominerales, cuya aglutinación determina la textura y estructura de un suelo.

Otro dato relevante con respecto a la materia orgánica es su afinidad por los metales pesados. Cuando éstos se encuentran en disolución, a menudo forman complejos orgánicos solubles, que pueden polimerizarse sobre los complejos moleculares del humus. También pueden formar directamente complejos insolubles con los compuestos del humus. De esta forma, la materia orgánica del suelo a menudo actúa como almacén de estos elementos, si bien puede transferirlos a la vegetación o a la fase acuosa si se produce su descomposición en medio ácido u oxidante.

#### **Microorganismos tolerantes y resistentes a elementos químicos**

El suelo provee un hábitat para una gran variedad de organismos desde microbios hasta especies superiores como plantas. Las propiedades biológicas del suelo (Ver Anexo Nº 2.1) incluyen la actividad y diversidad de microorganismos del suelo.

Los microorganismos como hongos y bacterias consumen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales se alimentan y obtienen energía. Los factores fisicoquímicos del suelo como pH, superficie o radio de acción, temperatura, salinidad, materia orgánica, disponibilidad de oxígeno, afectan el hábitat microbiano.

Dentro de la amplia diversidad microbiana, existen **microorganismos resistentes y microorganismos tolerantes a metales y otros elementos químicos**. Los **resistentes** se caracterizan por poseer mecanismos de destoxificación codificados genéticamente, inducidos por la presencia del metal.

En cambio, los **tolerantes** son indiferentes a la presencia o ausencia de metal. Tanto los microorganismos resistentes como tolerantes son de particular interés como captadores de metales en sitios contaminados, debido a que ambos pueden extraer los contaminantes.

Los metales pesados son tóxicos tanto para organismos superiores como para microorganismos. Los microorganismos del suelo desempeñan un papel importante en la movilización e inmovilización de cationes metálicos, siendo cada vez más aparente la reducción de los metales pesados por los microorganismos.

Como consecuencia de la alteración del estado de oxidación, los metales pueden convertirse en:

- ◇ más solubles en agua y pueden ser removidos por lixiviación
- ◇ inherentemente menos tóxicos
- ◇ menos solubles en agua, se precipitan y se convierten en menos biodisponibles
- ◇ pueden ser volatilizados

**Sin ser degradados biológicamente ni cambiar su estructura molecular.**

Otros microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas tales como combustibles o solventes, que son peligrosas para los seres humanos, y descomponerlas en productos inocuos mediante un proceso llamado **biodegradación**. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcar, alcohol y ácidos) contienen carbono orgánico, del cual se alimentan los microorganismos del suelo, y los nutrimentos adicionales intensifican su actividad. Además, las plantas aflojan el suelo y transportan agua al lugar, facilitando así la biodegradación.

Por lo anterior los microorganismos pueden ser considerados como reactores bioquímicos que conducen el proceso de biodegradación de contaminantes del suelo.

Esta idea es una extensión lógica de varios estudios que demuestran que **numerosos procesos bioquímicos se llevan a cabo con la ayuda de microorganismos**. Sin embargo, se conoce muy poco acerca de la enorme diversidad de las poblaciones microbianas del suelo, sus propiedades, su comportamiento en el entorno del suelo.

Es fundamental el rol de los microorganismos en los ciclos biogeoquímicos de los metales y su utilización en los procesos de biorremediación de desechos sólidos y líquidos es esencial para el cuidado del medio ambiente.

### **Transformaciones microbiológicas en los compuestos de arsénico**

En los suelos se producen tanto cambios oxidativos como reductivos en los metanoarsoniatos y en el ácido cacodílico. La oxidación del carbono metílico del ácido metanoarsónico disódico (DSMA) a dióxido de carbono se da bajo condiciones de suelos aeróbicos y está directamente afectada por la cantidad de materia orgánica disponible para la actividad microbiana. Se ha observado que el 20 % del ácido metanoarsónico monosódico (MSMA) añadido al cultivo bacteriano del suelo era degradado a dióxido de carbono y arseniato después de tres días; no pudiendo detectarse cantidad alguna de arsenito. Se ha demostrado que el ácido cacodílico (CA) es desmetilado por la actividad microbiana. La persistencia del ácido cacodílico también se ve afectada por el tipo de suelo; ya que transcurridas 32 semanas desde la aplicación del compuesto en dos contenedores cerrados de idénticas características se detecta más carbono 14 en un suelo margo-arenoso que en uno margo-arcilloso; debiéndose las pérdidas, principalmente, a diferentes transformaciones microbianas.

Sin embargo, en estudios sobre metanoarsoniatos añadidos al suelo, no se encuentra ninguna prueba de que aquellos, fueran desmetilados.

Existe una gran cantidad de estudios sobre la pérdida de arsinas volátiles, que sugieren que el arseniato es reducido a arsenito y este compuesto es transformado en arsina, perdiéndose de esta forma a la atmósfera desde suelos de arroz inundados, aunque más tarde se encontró que este proceso únicamente representaba un pequeño porcentaje del arsénico total. En condiciones similares, es decir ambiente reductor, no se encontraron pérdidas de arsina desde suelos tratados con arseniato.

Recientemente, se han llevado a cabo diversos estudios sobre la evolución del arsénico gaseoso en suelos y sedimentos, usando arsénico marcado radioactivamente; observándose bajo condiciones anaeróbicas, volatilizaciones altas o elevadas de arsénico (60%) desde suelos tratados con ácido cacodílico (CA), mientras que sólo se da un 35% de pérdidas en condiciones aeróbicas.

También se han encontrado pérdidas de arsénico en suelos tratados con DSMA, dependiendo éstas del contenido de humedad y de materia orgánica. En trabajos posteriores, se ha hallado arsinas alcalinas que se generan más rápidamente y en mayores cantidades desde suelos aeróbicos que desde anaeróbicos, indiferentemente del tratamiento arsenical aplicado.

Tanto la trimetilarsina (TMA) como la dimetilarsina (DMA) se han aislado e identificado en el aire circundante a los cultivos tratados con arsenito sódico o CA, mientras que solamente la TMA fue identificada sobre cultivos tratados con ácido metanoarsónico.

Se encuentra que el aire que rodea a suelos tratados con arseniato sódico, ácido metanoarsónico disódico (MSMA) o con ácido cacodílico (CA) contiene trimetilarsina (TMA) y dimetilarsina (DMA), pero no metilarsina.

No se han encontrado, sin embargo, indicios de DMA y TMA en la atmósfera de suelos tratados con arseniato, habiendo identificado las emisiones volátiles desde dichos suelos como arsina y metilarsina.

El arsenito será oxidado en la mayoría de los suelos agrícolas a arseniato.

## Microorganismos en el sistema suelo-planta

### Rizósfera

El término “rizósfera” fue introducido por primera vez en 1904 para descubrir la interacción específica entre la bacteria y las raíces de las leguminosas. En un gramo de peso seco de suelo rizosférico existe una gran cantidad de microorganismos.

La biomasa de microorganismos puede exceder 500 mg de carbón por kilogramo de suelo. Sin embargo, los microorganismos sólo comprenden menos del 3% del carbono orgánico del suelo y ocupan sólo 0.001% del volumen total.

La densidad de las poblaciones microbianas varía significativamente verticalmente y horizontalmente en el suelo. La dispersión de la biomasa microbiana dentro de una muestra de suelo está relacionada con diversos factores como la distancia de la superficie del suelo debido a la difusión de oxígeno, la locación y disponibilidad de materiales orgánicos como fuentes potenciales de comida.

Los microorganismos que habitan en la rizósfera y que interactúan con las raíces de las plantas formando útiles *asociaciones simbióticas*, hacen posible la supervivencia de las plantas bajo condiciones de estrés como deficiencia de nutrimentos, alta concentración de metales pesados, sequedad del suelo, afectan la asociación de las raíces de las plantas por los hongos micorrízicos y *Rhizobium*.

### Hongos micorrízicos

Cincuenta años antes de Frank, estas asociaciones eran consideradas, de naturaleza parasítica, hasta que en 1987 se pudo demostrar que la **colonización de las raíces era más bien simbiótica** en lugar de parasitaria. La simbiosis micorrízica se refiere a la asociación estrecha entre plantas y hongos como “un estado de interdependencia fisiológica equilibrada de dos o más organismos, en el que no se estimulan permanentemente los mecanismos de reacción defensiva”. La relación hongo-suelo es la simbiosis más común en suelos y en suelos deficientes en nutrientes o en humedad se inoculan hongos para su mejoramiento. La inoculación se lleva a cabo colocando una pequeña masa de suelo/raíz correspondiente a una determinada planta, por debajo de la superficie del suelo. La simbiosis micorrízica incrementa la efectividad en la absorción de nutrientes, mejorando el crecimiento o aumento en la biomasa en las plantas. Las plantas inoculadas son más resistentes al estrés ambiental que las plantas no inoculadas.

La clasificación de los hongos micorrízicos está en función a los tipos de micorrizas.

Aunque en general se reconocen dos tipos de micorrizas:

endotróficas (**endomycorrizas**) y ectotróficas (**ectomycorrizas**)

Se menciona la existencia de un tercer grupo, la ecto-endomycorrizas considerado como un grupo intermedio entre las otras dos asociaciones, frecuente en los viveros.

La asociación de las plantas con hongos micorrízicos representa una serie de importantes ventajas entre las que destacan, protección contra ataque de parásitos y enfermedades, mayor área de extensión de las raíces facilitando la absorción de nutrimentos, así como también, de contaminantes inorgánicos y orgánicos.

### **Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)**

Los HMA son los microorganismos del suelo más comunes y constituyen un importante componente funcional del sistema suelo-planta, suceso presente en casi todos los hábitats y climas, incluyendo suelos perturbados por la contaminación. Sin embargo los suelos degradados pueden sufrir cambios en la diversidad y abundancia en las poblaciones de los HMA.

Se definen dos estructuras que son características de las micorrizas arbusculares:

Las **vesículas** que son grandes hifas infladas, en formas globosas usualmente llenas de lípidos, necesarias durante la etapa de crecimiento y sirven como órganos de energía y almacenamiento o como estructuras reproductivas.

Los **arbúsculos** sirven como *sitio de intercambio nutrimental* entre el hongo y el hospedero, presentan una vida media de 9 a 15 días, al cabo de los cuales se colapsan o son digeridos por la célula hospedera.

En este contexto, cuando las poblaciones de microorganismos degradativos como los hongos micorrízicos arbusculares son inoculados en sitios contaminados, estos deben poseer enzimas que ayuden a transformar el estado de oxidación de los metales, haciéndolos menos tóxicos.

Los hongos micorrízicos arbusculares, microorganismos que habitan el suelo y establecen una simbiosis de tipo mutualista con las raíces de una gran cantidad de plantas, ejercen gran influencia en la nutrición y tolerancia de las mismas a estrés bióticos y abióticos.

Por tanto, las limitantes que las plantas pueden encontrar en la recuperación de suelos contaminados es la dificultad para establecerse y prosperar en situaciones adversas por la contaminación; así como también su lento crecimiento y poco volumen radicular, por lo que la importancia y beneficios de la simbiosis con los hongos micorrízicos en este sentido es ampliamente reconocida.

## ANEXO Nº 3.1

### MONITOREOS DE AIRE, AGUA Y SUELOS DESDE 1999 A 2006

A) Información de los muestreos correspondientes a la ***inspección especial de Verificación de condiciones ambientales del Depósito de Relaves Mayoc*** (D&E Desarrollo y Ecología S.A.C. Informe Nº 108-2001-EM-DGM-DFM/MA) **2001**

Los puntos de muestreo escogidos en cada cuerpo receptor son, en varios casos, distintos a los determinados por la autoridad ambiental, de acuerdo a los objetivos de la inspección.

#### **Aguas para consumo humano de la población de Mayoc y Daza**

El agua proviene de la captación de un manantial en la margen izquierda del río Rímac y es captada en un reservorio construido 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 de las viviendas de la zona de Daza, el agua proviene de las filtraciones u ojos de agua de la quebrada denominada Chaupi, ubicada en la margen derecha del río Rímac y se almacena y distribuye de manera similar que en Mayoc.

Para el análisis las muestras se toman en dos puntos distintos a los puntos de control evaluados, una es la fuente y otra en la vivienda de una persona afectada.

**Tabla Nº 1: Puntos de muestreo de aguas**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h (m)
ML1	Agua de alimentación del reservorio Daza	8 699 682	358 210	3 185
ML4	Agua de caño de vivienda de Esther Santisteban Llata	8 699 208	358 137	3 124

Los resultados de los análisis de aguas para consumo humano en las inmediaciones del depósito de relaves de Mayoc se encuentran en la **Tabla Nº 2**.

**Tabla Nº 2.- Resultados de análisis químico de aguas para consumo humano**

Clave	Identificación	Parámetros Físico-químicos					
		pH	TSS (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)
ML1	Agua de alimentación del reservorio Daza	8,0	17,0	<0,100	0,019	<b>&lt;0,010</b>	<0,0002
ML4	Agua de caño de Esther Santisteban	8,0	12,0	<0,100	0,041	<b>&lt;0,010</b>	<0,0002
<b>NMP</b>	<b>Ley General de Aguas-Clase I</b>	5-9	--	0,05	5	<b>0,10</b>	0,002
<b>NPDWR</b>	<b>USEPA</b>	6,5-8,5	--	0,015	5	<b>0,01</b>	0,002

Fuente: J.Ramón del Perú (Certificado Nº10102095)

NPDWR: National Primary Drinking Water Regulation(s) (US EPA).

#### **Calidad de aire y material particulado sedimentado**

##### **Procedimiento para coleccionar material particulado (Polvo Sedimentado, 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.

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 escogerlos **antes (barlovento)** y **después (sotavento)** de la **posible fuente de contaminantes**.

Tanto el monitoreo de partículas totales en suspensión (PTS), como el muestreo de polvo sedimentado se llevan a cabo sobre superficies protegidas.

En la inspección especial se selecciona los **puntos de monitoreo en las tres localidades que rodean el depósito**. Ver **Tabla N° 3**.

El punto de monitoreo de Mayoc corresponde a la vivienda de la Sra. Emilia Rosales quien presenta contenido elevado de arsénico en la orina.

**Tabla N° 3.- Puntos de monitoreo de aire**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h (m)
PTS1	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón en Mayoc.(P-5A)	8 699 116	358 124	3 092
PTS2	Vulcanizadora de Anatolio Matencio Soto en Daza	8 699 313	357 980	3 835
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza – Pte. Tamboraque III. (P-5)	8 698 737	358 087	3 055

**Partículas Totales en Suspensión (PTS)**

Los datos del tiempo de muestreo de partículas totales suspendidas en aire, el flujo de aire y resultados de PTS en gramos están en la **Tabla N° 4**; los resultados de PTS en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $\text{mg}/\text{k}$  se encuentran en la **Tabla N° 5** y **Tabla N° 6**, respectivamente.

**Tabla N° 4.- Datos del monitoreo de PTS**

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

Fuente: Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC - Flujo de aire: (1,45  $\text{m}^3/\text{min}$ )

**Tabla N° 5.- Resultados de análisis químico de monitoreo de PTS**

Clave	Identificación	Parámetros Físico-químicos				
		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	116,4	0,10	0,36	<b>0,09</b>	0,0007
PTS2	Vulcanizadora de Anatolio Matencio Soto en Daza	257,8	0,11	0,41	<b>0,07</b>	0,001
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza – Pte. Tamboraque III	177,2	0,09	0,34	<b>0,05</b>	0,001
<b>NMP</b>	<b>Calidad de aire</b>	350	0,5	--	<b>6,0</b>	--
<b>NAAQS</b>	<b>USEPA/Referencial*</b>	260	1,5	--	<b>0,03*</b>	--

Fuente: Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC - NAAQS

**Tabla N° 6.- Resultados de análisis químico de PTS en concentración peso/peso**

Clave	Identificación	Parámetros Físicoquímicos			
		Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
PTS1	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón en Mayoc	873,3	3118,88	<b>788,98</b>	5,88
PTS2	Vulcanizadora de Anatolio Matencio en Daza	424,4	1586,28	<b>260,91</b>	4,06
PTS3	Vivienda de Gerardo Mendoza-Pte. Tamboraque III	516,0	1914,0	<b>288,00</b>	5,37

Fuente: Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

**Material particulado sedimentado (Polvo Sedimentado, PS)**

**Tabla N° 7.- Resultados de análisis químico de monitoreo de Material Particulado Sedimentado (Polvo Sedimentado PS)**

Clave	Identificación	Parámetros Físico-químicos				
		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	--	952,1	2573,0	<b>574,4</b>	5,14
PS2	Vivienda de Emilia Rosales Baldeón	--	432,2	4287,0	<b>385,2</b>	1,13
PS3	Vivienda de Esperanza Poviz	--	551,6	3816,0	<b>1001,0</b>	1,23

Fuente: Informe de Ensayo N°10239 de Environmental Laboratories Perú SAC

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 son de habitantes con As en la orina por encima de los valores normales. Ver **Tabla N° 8**.

**Tabla N°8.- Puntos de muestreo de polvo sedimentado**

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 ( <b>P-5A</b> )	8 699 117	358 121	3 058
PS3	Vivienda de Esperanza Poviz	8 699 181	357 998	3 129

Fuente: Verificación de condiciones ambientales del Depósito de Relaves Mayoc, MEM.

**Suelos naturales en la zona contigua al depósito de relaves**

Con una pala se excava a 40 cm de profundidad, se recoge unos 2 kg en bolsa plástica y se mezcla el material. Se elimina el aire de la bolsa y se cierra (EPA SOP 2012).

Las zonas contiguas al depósito Mayoc se usaron para actividades de cultivo y pastoreo, estando el suelo aledaño expuesto a las actividades propias del depósito y constituyéndose como **un medio de transmisión de contaminantes**.

Los suelos no tienen puntos de control establecidos. En la inspección se escoge dos puntos, uno cerca a los efluentes del depósito y otro usado en actividades agrícolas.

**Tabla N° 9.- Puntos de muestreo de suelos naturales**

Clave	Identificación	Coordenadas UTM		
		N	E	h (m)
MS4	Suelo de cultivo próximo a vivienda de Esperanza Poviz	8 699 116	328 025	3 148
MS5	Suelo de cultivo- pastoreo próximo a pozas de sedimentación	8 698 967	358 147	3 063

Fuente: Verificación de condiciones ambientales Depósito de Relaves Mayoc, MEM, Perú, 2001.

**Tabla N°10.- Resultados de análisis químico de suelos naturales**

Clave	Identificación	Parámetros Físicoquímicos			
		Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
MS4	Suelo de cultivo próximo a vivienda de Esperanza Poviz	1690,0	877,5	<b>358,5</b>	2,71
MS5	Suelo de cultivo y pastoreo próximo a pozas de sedimentación	5053,0	3695,0	<b>330,1</b>	2,68
	Referencia *	1 200		<b>1-40</b>	

Fuente: 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

#### **Procedimiento para la toma de muestras de RELAVES**

Con una pala se excava a 15 cm de profundidad, se mezcla el material extraído y se recoge de 1 a 5 kg en bolsas plásticas. Se toman muestras de material suelto (fresco, antes de su compactación) de la relavera, obteniendo un compuesto y también de un lodo asentado en el canal hacia el río Rímac para comparar con la muestra de relave seco compactado y con la muestra malla -200 de esta última, en su composición.

**Tabla N° 11.- Puntos de muestreo de relaves**

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 Rímac	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: Verificación de condiciones ambientales Depósito de Relaves Mayoc, Perú, 2001.

Los resultados se presentan en la **Tabla N° 12.**

**Tabla N° 12.- Resultados de análisis químico de relaves**

Clave	Identificación	Parámetros Físicoquímicos			
		Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
MS1	Compósito de material húmedo de relavera	1 480	1 900	<b>17 540</b>	1,14
MS2	Lodo a lo largo del canal que conduce efluentes al Rímac	2 310	2 940	<b>25 610</b>	1,26
MS3	Material seco de relave en la cuchilla del talud	1 450	1 900	<b>16 330</b>	1,11
MS1-200	Material de relave malla -200	2 780	3 610	<b>24 820</b>	--

Fuente: Certificado N°10102094 de J. Ramón del Perú SAC

Utilizando métodos microscópicos y difracción de rayos X se obtiene la composición mineralógica del relave y análisis granulométrico por tamizado. Ver **Tabla N° 13.**

Tabla N° 13.- Resultados de análisis mineralógico de relaves

Espece mineral	Composición Química	Solubilidad	Abundancia (%)
<b>Arcilla:</b> Como granos muy finos	$\text{Ca}_{0,24} \text{Na}_{0,01} \text{Mg}_{0,36} \text{Fe}_{0,02} \text{Al}_{1,75} \text{Si}_{3,87} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot 1,078 \text{H}_2\text{O}$	Parcialmente en ácidos	22
<b>Yeso:</b> Ocurre como granos muy finos diseminados en la muestra.	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	En HCl caliente	18
<b>Muscovita:</b> Correspondiente a micas finas de sericita.	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Insoluble	15
<b>Cuarzo:</b> Como granos subangulosos libres.	$\text{SiO}_2$	Soluble en HF	13
<b>Microclina:</b> Como granos finos alterándose.	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Insoluble	10
<b>Ortoclasa:</b> Granos finos alterándose.	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	--	6
<b>Anortita:</b> Granos finos diseminados alterándose.	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Parcialmente en HCl	3
<b>Pirita:</b> Como granos libres.	$\text{FeS}_2$	Soluble en $\text{HNO}_3$	5
<b>Escorodita:</b> Como partículas finas alterándose.	<b><math>\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math></b>	<b>Soluble en <math>\text{H}_2\text{SO}_4</math></b>	3
<b>Carbonatos:</b> Principalmente como granos finos de calcita.	$\text{CaCO}_3$	Soluble en HCl	2
<b>Esfalerita:</b> Granos finos.	$\text{ZnS}$	<b>Soluble en <math>\text{HNO}_3</math></b>	0,3
<b>Calcopirita:</b> En proceso de alteración.	$\text{CuFeS}_2$	Soluble en $\text{HNO}_3$	0,3
<b>Galena:</b> Granos finos.	$\text{PbS}$	<b>Se sulfata con <math>\text{HNO}_3</math></b>	0,3
<b>Pirrotita:</b> Como granos libres.	$\text{FeS}$	Soluble en $\text{HNO}_3$	0,3
<b>Arsenopirita:</b> Como granos finos libres.	<b><math>\text{FeAsS}</math></b>	<b>Soluble en <math>\text{HNO}_3</math></b>	0,1
<b>Cobres Grises:</b> Como granos libres.	<b><math>\text{Cu}_{12}(\text{As,Sb})_4\text{S}_{13}</math></b>	Soluble en HCl	0,2
<b>Hematita:</b> Como granos libres.	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Lentamente sol. en HCl	0,2
<b>Magnetita:</b> Como granos libres.	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Lentamente sol. en HCl	0,2
<b>Ilmenita:</b> Asociado a la magnetita.	$\text{FeTiO}_3$	--	0,2
<b>Biotita:</b> 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 $\text{H}_2\text{SO}_4$	0,1
<b>Anatasa:</b> Como granos finos.	$\text{TiO}_2$	Insoluble	0,1

**B) RESULTADOS DE MONITOREOS DE AGUA, AIRE, SUELOS Y RELAVES  
(1999-2006)**

**Tabla N° 14.- REGISTROS DE MONITOREOS por ESTACIONES DE CONTROL -  
CALIDAD DE AGUA**

**PUNTO 5 A: 8 699 043 N; 358 214 E; 3032 msnm Río Rímac, aguas arriba de cancha de relaves Mayoc**

Estándar	Dic. 98 - May 2000	Set. 99	Jul. 2000	II-F 2003	III-F 2003	Ex. Esp. 2004	Agosto 2005	Dic. 2005	Febrero 2006
Clases II - III	SINMA	EQUAS	SGS	Aurora Catacora Tejada		BO Consulting	ANTES	Durante	DESPUÉS
	ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC (1)			Fiscalizaciones trimestrales 2003 Examen especial 2004 (2)			REMOCIÓN DE RELAVES Depósito Mayoc (3)		
5 - 9	8,25 149,5	7,25 92	7,60 4	7,7,5 < 4,00	7,90 76,00	8,40 4,10	8,56	8,44	8,54
<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,116</b>	<b>0,023</b>	<b>0,018</b>	<b>0,020</b>	<b>0,031</b>	<b>0,018</b>	<b>0,0223</b>	<b>0,0239</b>	<b>0,0302</b>
1 - 0,5		0,084	< 0,03	< 0,005	0,021	0,020	< 0,025	< 0,025	0,077
1		2,075	< 0,03	< 0,008	2,317	0,230	0,30	0,13	0,46
0,05 - 1		0,121	< 0,03	< 0,010	< 0,010	0,010	0,025	0,051	0,033
5 - 25		0,790	0,75	0,14	0,46	0,25	0,161	0,112	0,940
0,100		0,125	< 0,02	-	-	< 0,005 *			
<b>NMP DL 17752</b>	Valor promedio					* Cianuro WAD			

**PUNTO 5: 8 698 506 N; 358 077 E; 2 978 msnm Río Rímac, aguas abajo de cancha de relaves Mayoc y aguas arriba de la Planta Puente Tamboraque**

Estándar	Dic. 98 - May 2000	Set. 99	Jul. 2000	II-F 2003	III-F 2003	Ex. Esp. 2004	Agosto 2005	Dic. 2005	Febrero 2006
Clases II - III	SINMA	EQUAS	SGS	Aurora Catacora Tejada		BO Consulting	ANTES	Durante	DESPUÉS
	ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC (1)			Fiscalizaciones trimestrales 2003 Examen especial 2004 (2)			REMOCIÓN DE RELAVES Depósito Mayoc (3)		
5 - 9	8,31 145,2	7,50 92	8,30 3	7,89 < 4,00	8,15 66	8,53 8,80	8,38	8,38	8,54
<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,080</b>	<b>0,058</b>	<b>0,017</b>	<b>0,018</b>	<b>0,032</b>	<b>0,012</b>	<b>0,0156</b>	<b>0,047</b>	<b>0,0284</b>
1 - 0,5		0,084	< 0,03	< 0,005	0,043	< 0,020	< 0,025	< 0,025	0,071
1		1,937	< 0,03	< 0,008	2,685	0,060	0,14	0,24	0,37
0,05 - 1		0,118	< 0,03	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,025	0,058	0,034
5 - 25		0,620	< 0,05	0,10	0,54	0,10	0,102	0,095	0,885
0,100		0,125	< 0,02	-	-	< 0,005			
<b>NMP DL 17752</b>	Valor promedio					* Cianuro WAD			

**PUNTO 13: 8 697 662 N; 357 725 E; Puente Tamboraque N° 2**

Estándar	Dic. 98 - May 2000	Set. 99	Jul. 2000	II-F 2003	III-F 2003	Ex. Esp. 2004	Agosto 2005	Dic. 2005	Febrero 2006
Clases II - III	SINMA	EQUAS	SGS	Aurora Catacora Tejada		BO Consulting	ANTES	Durante	DESPUÉS
	ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC (1)			Fiscalizaciones trimestrales 2003 Examen especial 2004 (2)			REMOCIÓN DE RELAVES Depósito Mayoc (3)		
5 - 9	8,37 197,6	7,65 154	- -	7,89 < 4,00	8,09 55,00	8,34 300,60			
<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,152</b>	<b>0,918</b>	-	<b>0,019</b>	<b>0,031</b>	<b>0,018</b>			
1 - 0,5		0,136	-	< 0,005	0,030	< 0,020			
1		3,37	-	< 0,008	1,996	0,110			
0,05 - 1		0,400	-	< 0,010	< 0,010	< 0,010			
5 - 25		2,65	-	0,11	0,42	0,13			
0,100		0,062	-	-	-	< 0,005			
<b>NMP DL 17752</b>	Valor promedio					* Cianuro WAD			

**PUNTO 13 A: 8 697 454 N; 357 712 E; 2 954 msnm** Río Rímac, aguas abajo de la Planta Concentradora

Estándar	Dic. 98 - May 2000	Set. 99	Jul. 2000	II-F 2003	III-F 2003	Ex. Esp. 2004	Agosto 2005	Dic. 2005	Febrero 2006
Clases II - III	SINMA	EQUAS	SGS	Aurora Catacora Tejada		BO Consulting	ANTES	Durante	DESPUÉS
	<b>ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC (1)</b>			<b>Fiscalizaciones trimestrales 2003 Examen especial 2004 (2)</b>			<b>REMOCIÓN DE RELAVES Depósito Mayoc (3)</b>		
5 - 9	8,27	8,05	7,90	7,89	7,92	8,22	8,23	8,17	8,32
	58,3	188	11	< 4,00	248,00	7,01			
<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,144</b>	<b>1,080</b>	<b>0,019</b>	<b>0,015</b>	<b>0,420</b>	<b>0,019</b>	<b>0,0262</b>	<b>0,0499</b>	<b>0,0313</b>
1 - 0,5		0,139	< 0,03	0,021	0,092	0,052	< 0,025	< 0,025	0,082
1		3,952	< 0,03	0,181	6,970	0,410	0,34	0,79	0,46
0,05 - 1		0,440	< 0,03	< 0,010	< 0,010	0,010	< 0,025	0,115	0,034
5 - 25		2,138	0,36	0,65	0,91	0,79	0,361	0,335	0,973
0,100		0,125	< 0,02	-	-	< 0,005			
<b>NMP DL 17752</b>									

**PUNTO 14: 8 697 289 N; 357 556 E; 3032 msnm** Toma de agua de EDEGEL, después de confluencia con río Aruri

Estándar	Dic. 98 - May 2000	Set. 99	Jul. 2000	II-F 2003	III-F 2003	Ex. Esp. 2004	Agosto 2005	Dic. 2005	Febrero 2006
Clases II - III	SINMA	EQUAS	SGS	Aurora Catacora Tejada		BO Consulting	ANTES	Durante	DESPUÉS
	<b>ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC (1)</b>			<b>FISCALIZACIONES TRIMESTRALES 2003 EXAMEN ESPECIAL 2004 (2)</b>			<b>REMOCIÓN DE RELAVES DEPÓSITO MAYOC (3)</b>		
5 - 9	8,22	-	8,20		7,89	8,05	8,21		
	165,01	-	3		< 4,00	181,60	7,00		
<b>0,1 - 0,2</b>	<b>0,059</b>	-	<b>0,017</b>		<b>0,023</b>	<b>0,041</b>	<b>0,026</b>		
1 - 0,5		-	< 0,03		0,017	0,102	0,080		
1		-	< 0,03		0,282	5,791	0,690		
0,05 - 1		-	< 0,03		< 0,010	< 0,010	0,022		
5 - 25		-	0,35		0,64	0,91	0,88		
0,100		-	< 0,02		-	-	< 0,005		
<b>NMP DL 17752</b>	Valor promedio						* Cianuro WAD		

EAI: Empresa de Auditoría e Inspectoría adscrita al Minem. EAI SINMA: contratada por la Empresa Minera. EAI EQUAS y SGS a nombre del Estado.

Fiscalizaciones 2003-2004 por encargo del Estado. Después que MEM ordena paralización definitiva de relavera (Informe N°108-2001-EM-DGM-DFM/MA).

Fuente: (1) Estudio de la contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc – Informe de suficiencia para optar el título profesional de Licenciada en Química, Lira Velis Pajuelo, Lima 2002.

(2) Informe de Fiscalizaciones trimestrales 2003, Concesión de Beneficio “Concentradora Tamboraque” L&Z S.A.– Aurora Catacora Tejada; Informe del examen Especial 2004 en Normas de Protección y Conservación del Ambiente, Concesión de Beneficio “Concentradora Tamboraque” L&Z S.A.– BO Consulting S.A., Anexo 4: J. Ramón, Informe de Monitoreo N° 1040166. Plan de Cierre del depósito de Relaves Mayoc

(3) SVS Ingenieros S.A. Informe de Supervisión de Monitoreo de la Calidad del Aire y Agua - Remoción de Relaves de Mayoc.

(4) Informe de auditoría ambiental de verificación de ejecución de Plan de Cierre del depósito de relaves Mayoc, Cía. Minera San Juan Perú S.A. D&E Desarrollo y Ecología S.A.C.

LGA: Ley General de Aguas D.L N° 17752. Clase II. Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y coloración, aprobados por el Ministerio de Salud.

Clase III.

## CALIDAD DE AIRE

**Tabla Nº 15.- REGISTROS DE MONITOREOS POR ESTACIONES DE CONTROL**

### ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC

**PUNTO P-5: 8 698 737 N; 358 087 E** - Vivienda de Gerardo Mendoza, cerca de Puente Tamboraque Nº 3 (Barlovento)

Parámetro	Jun 99	Set 99	Feb 2000	Jul 2000	Estándar	Referencia
µg/m <sup>3</sup>	DIGESA	EQUAS	Consult-cont	SGS	NMP	
PTS	180,7	325	-	82	<b>260</b>	<b>USEPA hasta 1987</b>
PM 10	-	125	101	-	150	USEPA/Nacional
Pb	0,30	0,21	0,22	0,007	1,5	Venezuela/MEM
<b>As</b>	<b>0,52</b>	<b>0,34</b>	<b>0,18</b>	<b>0,0055</b>	6,0	MEM

**PUNTO P-5A: 8 699 116 N; 358 124 E** - Vivienda de Emilia Rosales Baldeón - Mayoc

Parámetro	Jun 99	Set 99	Feb 2000	Jul 2000	Estándar	Referencia
µg/m <sup>3</sup>	DIGESA	EQUAS	Consult-cont	SGS	NMP	
PTS	109	138	-	94	<b>260</b>	<b>USEPA hasta 1987</b>
PM 10	-	53	39	46	150	USEPA/Nacional
Pb	0,18	0,17	0,19	0,44	1,5	Venezuela/MEM
<b>As</b>	<b>0,33</b>	<b>0,13</b>	<b>0,11</b>	<b>0,45</b>	6,0	MEM

**PUNTO E-3: 8 699 313 N; 357 980 E** - Vivienda de Carmen Hidalgo en Daza

Parámetro	Jun 99	Set 99	Feb 2000	Jul 2000	Estándar	Referencia
µg/m <sup>3</sup>	DIGESA	EQUAS	Consult-cont	SGS	NMP	
PTS	118	117	-	114	<b>260</b>	<b>USEPA hasta 1987</b>
PM 10	-	45	-	-	150	USEPA/Nacional
Pb	0,20	0,15	-	0,007	1,5	Venezuela/MEM
<b>As</b>	<b>0,25</b>	<b>0,26</b>	-	-	6,0	MEM

**PUNTO E-1: 8 700 205 N; 358 540 E** - Centro de Salud 1ªCuadra Av. Leguía s/n - San Mateo

Parámetro	Jun 99	Set 99	Feb 2000	Jul 2000	Estándar	Referencia
µg/m <sup>3</sup>	DIGESA	EQUAS	Consult-cont	SGS	NMP	
PTS	157	-	-	-	<b>260</b>	<b>USEPA hasta 1987</b>
PM 10	-	-	-	-	150	USEPA/Nacional
Pb	0,29	-	-	-	1,5	Venezuela/MEM
<b>As</b>	<b>0,29</b>	-	-	-	6,0	MEM

Fuente: Estudio de la contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc – Informe de suficiencia para optar el título profesional de Licenciada en Química, Lira Velis Pajuelo, Lima 2002.

## CALIDAD DE AIRE

**Tabla N° 16.- REGISTROS DE MONITOREOS POR ESTACIONES DE CONTROL**

### FISCALIZACIONES TRIMESTRALES 2003 y EXAMEN ESPECIAL 2004

**PUNTO 5-A: 8 699 100 N; 358 129 E; 3023 msnm**  
Poblado de Mayoc

Parámetro	II F 2003	III F 2003	Ex. Esp. 2004	Estándar	Referencia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$				<b>ECA - Aire(1)</b>	<b>NMP (2)</b>
PM 10	37,49	69,47	113,15	150 (3)	150 (5)
Pb	< 0,01	< 0,1	0,051	1,5 (4)	<b>0,5 (6) - 1,5 (7)</b>
<b>As</b>	<b>&lt; 0,01</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,0174</b>	ND	<b>6 (8) - 30 (9)</b>

**PUNTO Cancha 1-2: 8 697 646 N; 357 959 E; 3028 msnm**  
Cancha de relaves 1 y 2

Parámetro	II F 2003	III F 2003	Ex. Esp. 2004	Estándar	Referencia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$				<b>ECA - Aire(1)</b>	<b>NMP (2)</b>
PM 10	-	52,60	70,73	150 (3)	150 (5)
Pb	ND	< 0,1	0,039	1,5 (4)	<b>0,5 (6) - 1,5 (7)</b>
<b>As</b>	ND	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,033</b>	ND	<b>6 (8) - 30 (9)</b>

- (1) ECA – Aire, estándares Ambientales de Calidad de Aire, D.S. N° 074-2001-PCM
- (2) NMP, Niveles Máximos permisibles de calidad de Aire, R.M. N° 315-96-EM/VMM
- (3) Media aritmética diaria (24 horas), no se puede exceder más que 3 veces al año.
- (4) Promedio mensual, no se puede exceder más que 4 veces al año.
- (5) Media geométrica anual
- (6) Media aritmética anual
- (7) Promedio mensual
- (8) Media aritmética diaria (24 horas)
- (9) Concentración promedio en 30 minutos, no se puede exceder más que 4 veces al año.

Fuente.- Informe de Fiscalización especial del 2004 de Cumplimiento de Normas de Protección y Conservación del Ambiente de la Concesión de beneficio "Concentradora Tamboraque" del titular Larizbeascoa y Zapata S.A.C. (L&Z), por BO Consulting S.A., 2004.

## CALIDAD DE AIRE

**Tabla Nº 17.- REGISTROS DE MONITOREOS POR ESTACIONES DE CONTROL**

### REMOCIÓN DE RELAVES DEPÓSITO MAYOC

**PUNTO E-1: 8 699 188 N; 358 030 E; 3084 msnm** Glorieta de Mayoc, Barlovento del depósito

Parámetro	Ago 2005	Enero 2006	Marzo 2006	Abril 2006	Estándares de Referencia	
	(A)	(B)	(C)	(D)	NMP (1)	ENCA (4)
µg/m <sup>3</sup>						
PM 10	77	45	50,5	32	350 (2)	150 (5)
Pb	0,09	0,02	0,03	0,03	1,5 (3)	<b>1,5 (6)</b>
<b>As</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,007</b>	<b>6 (2)</b>	-

Frecuencia de monitoreo: Continua con cambio de filtro cada 24 horas

Fuente: SVS Ingenieros S.A. Informe de Supervisión de Monitoreo de la Calidad del Aire y Agua Remoción de Relaves de Mayoc.

- (A) Antes de la remoción de relaves
- (B) Durante remoción de relaves
- (C) Después de remoción de relaves
- (D) Auditoría Ambiental de Cierre

**PUNTO E-2: 8 698 594 N; 358 197 E; 2934 msnm**

Estación ferrovías Tamboraque Sotavento del depósito Mayoc

Parámetro	Ago 2005	Enero 2006	Marzo 2006	Abril 2006	Estándares de Referencia	
	(A)	(B)	(C)	(D)	NMP (1)	ENCA (4)
µg/m <sup>3</sup>						
PM 10	95	43	45,5	37	350 (2)	150 (5)
Pb	0,14	0,03	0,04	0,06	1,5 (3)	<b>1,5 (6)</b>
<b>As</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,008</b>	<b>6 (2)</b>	-

Frecuencia de monitoreo: 24 horas cada tres días

**PUNTO E-3: 8 697 704 N; 358037 E; 3064 msnm** - Entorno de planta concentradora Tamboraque, en las proximidades de los depósitos de relaves N<sup>o</sup>1 y 2.

Parámetro	Ago 2005	Enero 2006	Marzo 2006	Abril 2006	Estándares de Referencia	
	(A)	(B)	(C)	(D)	NMP (1)	ENCA (4)
µg/m <sup>3</sup>						
PM 10	46	29	23,5	17	350 (2)	150 (5)
Pb	0,05	0,03	< 0,02	0,02	1,5 (3)	<b>1,5 (6)</b>
<b>As</b>	<b>0,04</b>	<b>0,21</b>	<b>0,01</b>	<b>0,007</b>	<b>6 (2)</b>	-

Frecuencia de monitoreo: 24 horas cada tres días

Fuente: SVS Ingenieros S.A. Informe de Supervisión de Monitoreo de la Calidad del Aire y Agua - Remoción de Relaves de Mayoc.

- 1 Niveles Máximos Permisibles establecidos en la RM. N<sup>o</sup> 315-96-EM/VMM.
- 2 Concentración media aritmética diaria del anexo 3 de la RM. N<sup>o</sup> 315-96 EM/VMM.
- 3 Concentración mensual de plomo del anexo 3 de la RM. N<sup>o</sup> 315-96-EM/VMM.
- 4 ENCA: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (ENCA) establecido en el Decreto Supremo N<sup>o</sup> 074-2001-PCM.
- 5 Concentración durante 24 horas – ENCA
- 6 Concentración mensual de plomo – ENCA

## CALIDAD DE SUELOS

Tabla N° 18.- REGISTROS DE MUESTREOS

### ANTES DE PARALIZACIÓN DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN MAYOC – Febrero 2000

et	Suelos Agrícolas	Suelo Minero rehabilitado	Muestra 1-T	Muestra 2-T	Muestra 3-T	Muestra 4-T	Muestra 5-T	M
	Valor referencial (**)	Para uso agrícola	Muestras de suelos de la zona cultivada aguas arriba del depósito de relaves Mayoc					alre Pos Tan
co	0,002		0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	
			0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	
	0,002		0,19	0,13	0,07	0,09	0,1	
		0,040	0,59	0,39	0,22	0,25	0,26	
	---		4,77	4,24	4,52	3,84	4,88	
			7,9	8,0	7,9	7,8	8,1	

(\*) Pasta preparada con L/S: 1,0

(\*\*) **American Society of Agronomy, 1982**

Fuente: Auditoría de Consultcont en Febrero 2000. Velis Pajuelo Lira, Estudio de la contaminación por arsénico de los habitantes de Mayoc, Informe de Suficiencia, 2002.

## CALIDAD DE SUELOS

Tabla Nº 19.- REGISTROS DE MUESTREOS

### FISCALIZACIONES 2004

Concentración de elementos en los suelos aledaños a depósito de relaves Mayoc

Parámetro (mg/K)	GOLDER 2004				BO Consulting 2004			Rangos normales	Valor máximo
	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	Punto E	Punto F	Punto G		
Nº de muestras	6	5	6	7	1	1	1		
Arsénico	1491,30	479,00	196,42	251,71	2,10	2,00	18,60	1-40 <sup>(1)</sup>	27 00
Zinc	3237,50	1946,00	3380,00	1595,00	2485,30	1004,80	1893,50	10-300 <sup>(2)</sup>	35 00
Plomo	1642,67	725,00	1182,75	560,14	873,04	414,20	898,92	10-70 <sup>(3)</sup>	14 00
Cobre	556,00	249,00	396,17	184,14	263,71	103,05	438,50	2-250 <sup>(4)</sup>	11 00
Localización de muestras (suelo puntos)	<b>Halo depósito de Mayoc</b>	<b>Camino Glorieta de Mayoc</b>	<b>Chacras Glorieta de Mayoc</b>	<b>Patio de viviendas Glorieta de Mayoc</b>	<b>Suelo Poblado Mayoc</b>	<b>Suelo Plaza de Armas S. Mateo</b>	<b>Suelo ex-relave</b>		

(1) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Arsenic and Arsenic compound, 2da edición, Ginebra

(2) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 221: Zinc, 2da edición, Ginebra

(3) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 165: Inorganic lead, 2da edición, Ginebra

(4) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Copper, Ginebra

(\*) Reportados en áreas contaminadas por residuos mineros o refinerías

## CALIDAD DE SUELOS

Tabla Nº 20.- REGISTROS DE MUESTREOS

### ANTES DE REMOCIÓN DE RELAVES - JULIO 2005

Elemento	Rangos normales	Valores máximos *	PUNTO S-1	PUNTO S-2	PUNTO S-3	PUNTO S-4	PUNTO S-5
			8 702 142 N 363 201 E 3539 msnm	8 702 244 N 363 164 E 3546 msnm	8 697 769 N 357 769 E 3012 msnm	8 698 056 N 357 862 E 3020 msnm	8 698 056 N 357 862 E 3020 msnm
Cobalto	1-40 <sup>(1)</sup>	27 000 <sup>(1)</sup>	61,16	144,77	420,90	307,71	307,71
Cromo	---	---	39541,7	40347,0	36425,7	69675,1	43000,0
Cadmio	---	---	1,03	0,90	4,12	1,04	1,04
Cobre	2-250 <sup>(4)</sup>	11 000 <sup>(4)</sup>	582,8	237,5	549,0	632,0	582,8
Plomo	10-70 <sup>(3)</sup>	14 010 <sup>(3)</sup>	229	326,1	1571,8	1521,1	229
Mercurio	10-300 <sup>(2)</sup>	35 000 <sup>(2)</sup>	2089,3	389,8	3830,2	7329,8	4000,0
Plata	---	---	7,12	6,17	7,85	7,39	7,12
			Río Blanco, ~ a 100 m de Fundición	Costado de chimenea de Fundición antigua Río Blanco	A ~ 450 metros de la cancha 1 y 2.	Al costado de la Casa Quinta	Costado de compañía tomando de Hidroeléctrica y a ~ 100 m
			Corriente arriba	En laderas del cerro	Corriente arriba		Corriente ladera margen del Río

(1) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Arsenic and Arsenic compound, 2da edición, Ginebra

(2) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 221: Zinc, 2da edición, Ginebra

(3) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 165: Inorganic lead, 2da edición, Ginebra

(4) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Copper, Ginebra

(\*) Reportados en áreas contaminadas por residuos mineros o refinerías

Fuente: Informe de la auditoría ambiental de verificación de la ejecución del plan de cierre del depósito de relaves Mayoc - Compañía minera San Juan Perú S.A., D&E Desarrollo y Ecología S.A.C., Mayo 2006.

## CALIDAD DE SUELOS

**Tabla Nº 21.- REGISTROS DE MUESTREOS**

**Después de los trabajos de REMOCIÓN DE RELAVES - ENERO 2006**

metr (K)	Rangos normales	Valores máximos Reportados	PUNTO C-1 (*)	PUNTO C-2 (*)	PUNTO C-3 (**)	PUNTO C-4 (*)	PU C (
		en áreas contaminadas por residuos mineros	8 698 563,19 N 358 169,95 E	8 698 546,96 N 358 217,71 E	8 697 769 N 357 769 E 3012 msnm	8 698 056 N 357 862 E 3020 msnm	8 698 357 3029
co	1-40 <sup>(1)</sup>	27 000 <sup>(1)</sup>	<b>115,0 ..... M1</b> <b>42,0 ..... M2</b> <b>64,0 ..... M3</b>	<b>533,1</b> <b>22,5</b> <b>84,0</b>	<b>70,0</b> <b>38,5</b> <b>20,0</b>	<b>1391,0</b> <b>83,0</b> <b>187,3</b>	<b>30</b> <b>14</b> <b>9</b>
o	---	---	43880 46630 46270	45740 40030 44120	45310 43400 44120	45835 44820 44860	48 47 44
rio	---	---	0,20 0,14 0,20	0,18 < 0,04 0,14	0,14 0,18 0,17	0,12 0,08 0,09	4 1 1
e	2-250 <sup>(4)</sup>	11 000 <sup>(4)</sup>	65,4 46,9 46,1	99,8 42,8 46,6	48,0 45,3 43,0	86,7 41,8 53,1	24 31 14
o	10-70 <sup>(3)</sup>	14 010 <sup>(3)</sup>	1444 112 167	256 147 145	121 168 103	289 159 136	5 13 7
t	10-300 <sup>(2)</sup>	35 000 <sup>(2)</sup>	451,9 157,0 140,8	462,9 132,1 191,7	166,1 147,4 119,6	360,2 153,3 205,2	30 30 13

Muestras tomadas de 0 – 20cm de profundidad.

Muestras tomadas de 20 – 40cm de profundidad.

Muestras tomadas de 40 – 60cm de profundidad

(\*): Calicata confeccionada en **área donde estuvo ubicado el relave.**  
(\*\*): Calicata confeccionada al Norte del **área donde estuvo el relave.**

(1) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Arsenic and Arsenic compound, 2da edición, Ginebra

(2) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 221: Zinc, 2da edición, Ginebra

(3) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 165: Inorganic lead, 2da edición, Ginebra

(4) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Copper, Ginebra

Fuentes: Informe Auditoría ambiental de verificación de ejecución de plan de cierre Depósito de relaves Mayoc - D&E Desarrollo y Ecología, Mayo 2006. SVS Ingenieros S.A. Informe de Supervisión de Monitoreo de la Calidad del Aire y Agua - Remoción de Relaves de Mayoc.

## CALIDAD DE SUELOS

**Tabla Nº 22.- REGISTROS DE MUESTREOS**

**Auditoría Ambiental de Cierre - Abril 2006** (Después de los trabajos de REMOCIÓN DE RELAVES)

Parámetro	Unidad	Puntos de control (calicatas)								
		M-1 (*)		M-2 (*)		M-3 (*)		M-4 (*)		
		1	2	1	2	1	2	1	2	
Arsénico	mg/kg	4100,67	398,07	564,40	117,87	2148,00	445,33	200,93	124,73	1
Hierro		70017	53650	52417	51583	70017	55517	49217	47583	
Mercurio		3,284	0,771	0,838	0,469	0,771	0,704	0,871	0,402	
Cobre		398	74	96	47	391	98	74	49	
Plomo		811	105	175	73	524	121	141	75	
Zinc		2406	525	1001	287	994	325	445	225	
pH			7,5	7,6	7,3	7,5	7,1	7,2	7,8	7,7

(\*): Calicata confeccionada en **área donde estuvo ubicado el relave.**

M-1-1.....M-5-1: muestras tomadas de 0 – 20cm de profundidad.

M-1-2.....M-5-2: muestras tomadas de 40 – 60cm de profundidad.

(1) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Arsenic and Arsenic compound, 2da edición, Ginebra

(2) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 221: Zinc, 2da edición, Ginebra

(3) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 165: Inorganic lead, 2da edición, Ginebra

(4) World Health Organization, 2001, Environmental Health Criteria 224: Copper, Ginebra

(5) Cortesía de W. H. Allaway. Advan. Agron. 20:235 (1968): R. P. Murrman y F. R. Koutz. Special Report Nº 171. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab. Hanover. New Hampshire. 1972: y G. R. Bradford y colaboradores. J. Environmental Quality 4:123 (1975).

(6) Canadian Environmental Quality Guidelines – Agricultural Land uses.

Fuente: Segundo Informe Complementario Auditoría Ambiental de Verificación de Ejecución del Plan de Cierre-Depósito de Relaves Mayoc, Junio 2006.

CONCESIÓN DE BENEFICIO "CONCENTRADORA TAMBORAQUE" COMPAÑÍA MINERA SAN JUAN PERÚ S.A.

## CARACTERIZACIÓN DE RELAVES

**Tabla Nº 23.-** Elementos de importancia ambiental en relave de Mayoc

Estudio	Relave		Lixiviado
	GOLDER, 2004	SVS, 2005	SVS, 2005
Laboratorio	ALS Chemex (1)	Eco SGS Perú (2)	Eco SGS Perú (3)
Muestra	Promedio de 11 muestras	1 muestra compuesta	1 muestra compuesta
Parámetro (4)			
As	> 10 000 **	10 069	6,313
Sb	109	17	ND *
Cd	17	< 1 **	< 0,01 **
Cu	756	1 040	10,29
Fe	76 811	96 500	204,18
Hg	ND *	1	< 0,001 **
Ni	13	13	0,178
Pb	1 866	1 815	< 0,002 **
Zn	3 399	3 229	66,104
S	6,57	ND *	ND *

Fuente.- Plan de Cierre del depósito de relaves de Mayoc, SVS Ingenieros S.A., Abril 2005.

- (1) ICP-MS
- (2) ICP-OES (EPA 3050B, 1994); Hg por AAS-GH muestras de suelos 0,5/50 (EPA 7471-A, 1994)
- (3) SPLP (SW-846 EPA 1312), AAS (EPA 7000 series; ICP-OES (EPA 6010B) sobre una muestra solución/sólido 20:1 de solución de ácido sulfúrico y nítrico con %Peso 60/40, agitado de 16 a 20 horas.
- (4) Unidad de los elementos (ppm), salvo el azufre, S en %.

\* ND, No determinado

\*\* Valores > y < son respectivamente **mayores** y **menores** al límite de detección del método analítico empleado

Al mezclarse el relave con agua en la proporción 1:1 el lixiviado adquiere un pH de 2,1, por lo que se inertiza el relave ácido con cal y cemento.

## ANEXO N° 4.1

### INFORMES DE EVALUACIONES DE SALUD REALIZADAS POR DIVERSAS ENTIDADES

#### ENTIDADES ESTATALES DE SALUD

##### Año 1999

**Informe de Inspección a la Empresa Minera LIZANDRO PROAÑO S.A. – “PROYECTO TAMBORAQUE”,** 19-V-1999. Informe #441-99/DIGESA/DEEMA, Ministerio de Salud, Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA).

El Estado Peruano adquiere conocimiento detallado sobre la problemática de los relaves mineros en San Mateo desde el año 1999. El estudio de DIGESA encontró que los **relaves contienen altas cantidades de arsénico**, plomo, zinc y cianuro. Además *“la fuerza de los vientos en la zona y su direccionalidad, hacen prever la posibilidad de un impacto en zonas aledañas.”* Se hace hincapié en que la cancha no contaba con los cercos de seguridad ni la señalización mínima para impedir el acceso de personas extrañas a la operación de la misma ni a los animales.

**Evaluación Ambiental de la Cancha de Relaves de Mayoc e Inmediaciones,** DIGESA, 22 Julio 1999.

En Julio de 1999, DIGESA evalúa la Cancha de Relaves de Mayoc y encuentra contaminantes por sobre los límites permisibles, en los cuerpos de los comuneros y en las azoteas de las viviendas de Mayoc. Dicha evaluación, realizada en época seca, recomienda conducir una investigación durante la época de lluvias.

##### Año 2000

**Evaluación Ambiental realizada en la zona aledaña a la cancha de relaves de la minera Lizandro Proaño S.A.,** Ministerio de Salud, Dirección General de Salud (DIGESA), Octubre 2000, pg. 20.

En Octubre del 2000, DIGESA condujo una nueva Evaluación Ambiental en la zona aledaña a la cancha de relaves, la cual concluyó que dicha cancha *“constituye un alto riesgo de exposición de las poblaciones de Mayoc y Daza en San Mateo de Huanchor.”* Entre otros problemas, dicho estudio también demostró que las aguas del Río Rímac –de las cuales depende la población de Lima para su consumo– se encuentran contaminadas con arsénico y plomo, y que la **concentración de arsénico en los cultivos sobrepasa los límites de riesgo.**

Por último, dicho estudio también determina una relación de causalidad entre los relaves y la contaminación, señalando que, *“a menor distancia de la cancha de relaves, la contaminación del aire, agua, cultivos y suelos, respecto a residuos mineros es generalmente mayor, que a distancias más lejanas”.*

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

Se analiza las 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. Para una descripción más amplia de ésta evaluación, ver el acápite **5.3.1**.

### **Año 2001**

***Monitoreo de los Niveles de Exposición por Metales Pesados en la Población de San Mateo de Huanchor***, Ministerio de Salud, Dirección de Salud IV Lima Este, 30 Octubre 2001, Oficio No. 1497 – DISA IV LE /DESA-2001.

En Octubre de 2001, la Dirección de Salud IV Lima Este realiza el *monitoreo* indicado donde demostró que los habitantes de San Mateo han sido contaminados con metales pesados. Se encuentran valores de los elementos tóxicos por encima de los límites permisibles: el 67.8% (177) en plomo, el 24.9% (67) en cadmio, el 19% (43) en mercurio. Se demuestra que la proximidad a los relaves incide significativamente en la contaminación con metales.

En efecto, de **las personas que presentaron niveles de arsénico por encima de los límites permisibles, el 90.9% se encuentran próximos al relave**. Así mismo, de aquellos con niveles altos de plomo, el 68.9% se encuentran próximos al relave. En definitiva, estas cifras demuestran la ineludible relación causal que existe entre los relaves y la contaminación de la población y del ambiente.

### **Año 2003**

***Informe N° 603-2003-MEM-DGM/TNO***, numeral 5, del 03 de octubre del 2003.

En mayo del 2003, la empresa que presta servicio de agua potable y alcantarillado de Lima, SEDAPAL, pone en conocimiento del MEM los resultados del último **incremento abrupto de arsénico en el afluente del relave de Tamboraque, excediéndose en 45 veces los Límites Máximos Permisibles**. En atención a la grave contaminación, la prestadora de agua potable solicitó se notifique a la empresa minera que no continúe con los vertidos, pues está atentando contra la salud de la población de la ciudad capital.

## INFORMES DE EVALUACIONES REALIZADAS POR ENTIDADES PARTICULARES

### Año 2002

***Estudio exploratorio: Situación ambiental y Salud de las comunidades expuestas a contaminación por metales pesados de las actividades mineras. Cuenca media y alta del Río Rímac.*** Instituto de Salud y Trabajo, Julio 2003.

El Instituto Salud y Trabajo (ISAT) realizó un estudio en Octubre 2002 donde evaluó a 13 niños de zonas de relaves mineros del distrito de San Mateo de Huanchor, encontrándose que el 69,2% presentaba alguna enfermedad dermatológica no infecciosa (2 casos de eritema palmar, 1 caso de hiperqueratosis, 1 caso de hipopigmentación y 5 casos de xerosis). De ellos, el **30,8% presentaba niveles de arsénico mayores de 50 µg/L en orina de 24 horas**. Además encontró que la mayoría de los niños de Máyoc sufría de disfunción hepática, hipoacusia neurosensorial, y desnutrición crónica. Dicho estudio también determinó que en lo psicológico, el 86% de los niños tenía nivel intelectual inferior al término medio.

## INFORMES DE EVALUACIONES REALIZADAS POR ENTIDADES CIENTÍFICAS CON FINES DE INVESTIGACIÓN EN MEDICINA Y SALUD

### Año 2003

***Enfermedades Dermatológicas de Tipo No Infeccioso Asociadas a Exposición Crónica a Metales Pesados de Relaves Mineros. Estudios de Casos y Controles. San Mateo de Huanchor, Lima.*** Septiembre-Diciembre 2003. Universidad Nacional Mayor de San Marcos; Facultad de Medicina San Fernando.

Como detalla el estudio de la Universidad de San Marcos de Lima, la exposición al arsénico de los habitantes de San Mateo de Huanchor indica que “*la posibilidad de aparición de cáncer a la piel está latente*”. La exposición a los relaves mineros y al arsénico contenido, afecta no sólo la salud si no también la vida de las personas.

### Año 2004

***Queratosis arsenical en pobladores expuestos a relaves mineros en altura en San Mateo de Huanchor: ¿sinergismo entre arsenicismo y daño actínico crónico?*** W. Ramos et al. Sociedad Peruana de Dermatología, 2006.

El arsénico es un elemento muy tóxico que en personas con exposición crónica, produce manifestaciones cutáneas como hipopigmentación, hiperpigmentación, queratosis y se ha demostrado que puede causar cáncer de piel luego de un tiempo aproximado de latencia de 10 años o más.

Los pobladores expuestos a relaves mineros como consecuencia de la exposición crónica al arsénico desarrollan lesiones cutáneas de tipo queratosis como parte de las **dermatosis arsenicales**. Las queratosis arsenicales son **lesiones preneoplásicas** que constituyen la manifestación más frecuente de dermatosis arsenical, que adoptan una distribución principalmente palmoplantar, aunque pueden presentarse en tórax y áreas no expuestas al sol.

Sin embargo, en algunos lugares coexiste el arsenicismo con otros factores ambientales que pueden actuar desencadenando queratosis y/o exacerbando las existentes. Este es el caso del **daño actínico crónico** que puede desencadenar distintas lesiones y dentro de ellas las **queratosis actínicas**.

Las queratosis actínicas son lesiones preneoplásicas que se desarrollan como consecuencia de la exposición prolongada a la luz solar y deben ser tratadas por el riesgo de su conversión a carcinoma de células escamosas. Pueden variar desde pápulas de 1 a 2 mm a placas hiperpigmentadas o eritematosas de superficie hiperqueratósica. De manera similar, la queilitis actínica es una lesión preneoplásica que evoluciona con frecuencia a carcinoma de células escamosas; otras lesiones relacionadas a daño actínico son la dermatitis actínica y léntigo solar. **Situación que puede darse en las comunidades de Mayoc y Tamboraque en San Mateo de Huanchor.** Ver Figura Nº 5.2. Es por esta razón que **planteamos determinar la prevalencia de queratosis arsenical en la población expuesta a arsénico procedente de relaves mineros en San Mateo de Huanchor (3 290 msnm) con daño actínico crónico.**

#### Comentarios.-

El presente estudio muestra que la queratosis arsenical asociada a daño actínico crónico es frecuente en pobladores expuestos a relaves mineros en San Mateo de Huanchor, la tasa de prevalencia fue 6,7 casos por cada 100 pobladores. La queratosis arsenical se presenta en pobladores de San Mateo de Huanchor expuestos a relaves mineros, son fuente contaminante por arsénico.

Todos los casos se presentaron a un radio de 500 metros de distancia de dicha fuente de exposición, el género masculino fue el que mostró mayor afectación, las lesiones hiperqueratósicas fueron múltiples y en pacientes adultos, lo que concuerda con lo descrito por la bibliografía internacional.

El arsénico es *un metal pesado* que ha mostrado tener una fuerte afinidad por los queratinocitos humanos, a niveles bajos de exposición causa alteraciones morfológicas, citotoxicidad, alteración de la integridad de las membranas celulares, daño a nivel ADN y alteración de la síntesis proteica.

Recientemente se ha propuesto para el arsenicismo el mecanismo oxidativo mediado por especies reactivas de oxígeno –aniones superóxido, peróxido de hidrógeno y radicales hidroxilo–, los que inducirían en personas expuestas el desarrollo de queratosis arsenical.

El mecanismo por el que se desarrollaría queratosis arsenical en estos pobladores sería secundaria a la inhalación de relaves mineros, contacto y absorción percutánea.

El suministro de agua proviene de manantiales de regiones situadas a mayor altitud, las que son llevadas a un reservorio y sometidas a procedimientos de potabilización; no se ha determinado si estas aguas están contaminadas por arsénico; sin embargo, es poco probable (comunicación verbal del alcalde, Sr. Jorge Hurtado).

Estudios han mostrado que la contaminación por arsénico ha afectado la calidad de las aguas de regadío empleadas para el cultivo en Mayoc, por lo que pensamos que este tipo de contaminación afectaría también a la población mediante la ingesta de alimentos previamente regados con estas aguas.

Además del arsenicismo, los pobladores de estas comunidades de altura presentaron como factor de riesgo para cáncer de piel no melanoma una intensa exposición a la radiación solar.

Se sabe que en promedio, por cada 300 m de altura, la radiación solar se incrementa en 4%. Así, la población estudiada recibiría aproximadamente 44% más radiación solar que las personas que habitan a nivel del mar.

Todos los pacientes presentaron al menos un diagnóstico relacionado a daño actínico crónico independientemente de las lesiones arsenicales (dermatitis actínica, queilitis actínica o queratosis actínica), por lo cual planteamos que **muchas de estas lesiones causadas por el arsenicismo, a su vez deben haber sido modificadas por la radiación solar, lo cual resultaría en un efecto sinérgico para el desarrollo de cáncer de piel**; además **las lesiones actínicas pueden haber sido modificadas por la exposición a arsénico**. Hasta el momento, se desconoce el significado de estos hallazgos y sus implicancias en el riesgo de desarrollo y pronóstico de cáncer de piel no melanoma, sin embargo, el presente trabajo es un primer acercamiento para tratar de encontrar una respuesta a este problema.

## DETERMINACIÓN DE AS EN MATERIAL BIOLÓGICO (ORINA)

210

ANALYTICAL BIOCHEMISTRY 1, 491-497 (1960)

The Determination of Arsenic and Antimony in Biologic Material<sup>1</sup>LEO A. DAL CORTIVO<sup>2</sup> AND MICHAEL CEFOLAFrom *Fordham University, New York, New York*

AND

CHARLES J. UMBERGER

From *the Office of the Chief Medical Examiner, New York, New York*

Received September 20, 1960

## INTRODUCTION

The criminal use of arsenic and antimony is today infrequent. Nevertheless, both metals are of toxicologic importance because of their presence in many insecticides, rodenticides, antiprotozoal preparations, and other drugs. The laboratories of the Office of the Chief Medical Examiner of New York City receive annually about 500 requests for arsenic, antimony, and mercury determinations. A large number of these analyses is performed on blood and urine in cases of suspected metal intoxication. A method for arsenic and antimony which is at once rapid, sensitive, and specific is thus desirable. The Reusch test is neither sensitive nor specific. The classic Gutzeit method is not wholly satisfactory because of the variability of paper staining due to nonuniform evolution of the arsine or stibine. The molybdenum blue method is lengthy and requires careful control of final acidity and reducing conditions lest the reagent itself be reduced.

In 1952, Vasak and Sedvek (1) reported a method for the estimation of arsenic in biologic material. It involves the absorption of arsine by a pyridine solution of the silver salt of diethyldithiocarbamate. The resulting red color is measured photometrically. Their technique lacks the necessary sensitivity. More recently, several investigators (2-4) have employed the reaction for the determination of arsenic in various petroleum products. Excellent sensitivity and precision are achieved using specially designed absorbing columns.

<sup>1</sup>This work was supported in part by U. S. Atomic Energy Commission Grants AT(39-1)1906 and AT(39-1) 1895.

<sup>2</sup>Presently, Chief Toxicologist, Office of the Medical Examiner, Suffolk County, L. I., N. Y.

491

490

PAPADOPOULOS

substances and resulted in lower values in the upper phase than those reported by Svennerholm.

These results establish control values for neuraminic acid in protein and lipid fractions of various cerebral tissues of non-neurologic cases. They will form the basis of comparison with similar studies, now in progress, of analysis of brain tissues from degenerative and demyelinating cases, particularly those involving the basal ganglia areas, such as Parkinsonism.

## SUMMARY

The concentration of neuraminic acid was determined in the gray matter of the insular and temporal cortex as well as of the basal ganglia, and in the white matter of normal autopsy human brains. Samples from the cerebral tissues were separated into two fractions: a water-soluble lipid and a lipid-free residue. Neuraminic acid was determined in both fractions with the orcinol test after elimination of interfering substances by column chromatography. Only tissues from non-neurological cases were analyzed in this study in order to obtain control values for comparison with samples from areas with neurological disorders involving neuraminic acid.

## REFERENCES

1. KLENK, E., *Z. physiol. Chem.* 268, 50 (1941).
2. SVENNERHOLM, L., *Acta Chem. Scand.* 10, 694 (1956).
3. PAPADOPOULOS, N. M., AND HESS, W. C., *Georgetown Bull.* No. 14, 15 (1960).
4. PAPADOPOULOS, N. M., AND HESS, W. C., *Arch. Biochem. Biophys.* 88, 167 (1960).
5. PAPADOPOULOS, N. M., McLANE, J. E., O'DONERTY, D., AND HESS, W. C., *J. Nervous Mental Disease* 128, 450 (1959).
6. SVENNERHOLM, L., *Acta Soc. Med. Upsalienis* 62, 1 (1957).
7. CUMINGS, J. N., GOODWIN, H., AND CURZON, G., *J. Neurochem.* 4, 234 (1959).
8. LINDSEY, A., *J. Neurochem.* 3, 230 (1959).
9. FOLCH, J., LEES, M., AND STANLEY, S. G. H., *J. Biol. Chem.* 226, 497 (1957).
10. SVENNERHOLM, L., *Acta Chem. Scand.* 12, 547 (1958).
11. LONG, C., AND STAPLES, D. A., *Biochem. J.* 73, 385 (1959).
12. WARREN, L., *J. Biol. Chem.* 234, 1971 (1959).

The present report describes a simple, sensitive method for the estimation of arsenic and antimony in biologic matter using the reaction of arsine and stibine with silver diethyldithiocarbamate. An improved absorber is described which possesses the advantages of ease of operation and subsequent cleaning.

EXPERIMENTAL

Apparatus

*Wet Digestion Apparatus.* Bethge's (5) modification of the Klein extractor is used for wet destruction of organic matter (Fig. 1).

*Absorbing Apparatus (Fig. 2).* This column was designed by Umberger (6) for use originally as a scrubber in an alkoxy apparatus. The absorber

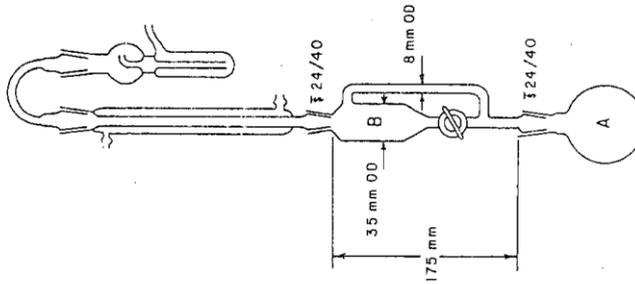


FIG. 1. Wet digestion apparatus.

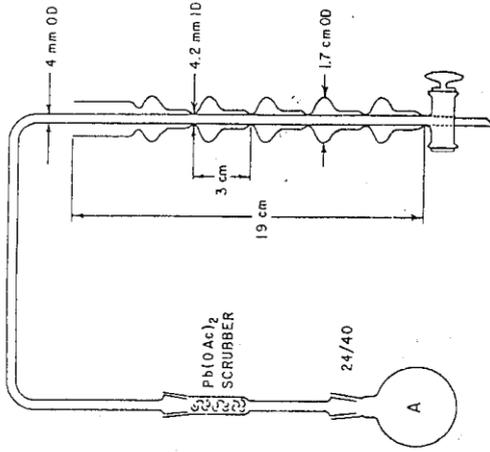


FIG. 2. Arsine (stibine) absorber.

consists of five bulbs shaped from a 25-cm length of 2 cm O.D. tubing. Between each bulb there is a constricted portion of 4.2 mm I.D. These constrictions permit insertion of a 25-cm length of 4 mm O.D. tubing throughout the length of the absorber. The 0.1-mm clearance at the constrictions insures complete and intimate contact between evolved gas and reagent during the percolation process. A No. 1 stopcock fused to the bottom of the column facilitates drainage and cleaning.

The gas delivery tube is connected to a scrubber containing a pledget of glass wool and powdered lead acetate to remove evolved hydrogen sulfide.

Reagents

*Standard Arsenic and Antimony Solutions.* Solutions covering the concentration range 0-100 µg/ml are prepared from the oxides of arsenic and antimony.

*Zinc Metal.* Reagent grade (low in arsenic), 20 mesh.

*Silver Diethyldithiocarbamate.* Prepare as follows: Solution A: 1.7 gm silver nitrate in 100 ml water. Solution B: 23 gm sodium diethyldithiocarbamate in 100 ml water.

Slowly add with stirring add soln. A to soln. B. Filter off the yellow

precipitate and wash with water. Dry in a vacuum desiccator. The salt is stable for months at room temperature.

**Working Solution of Silver Diethyldithiocarbamate.** Prepare a solution containing 5 mg silver diethyldithiocarbamate/ml of anhydrous, reagent-grade pyridine. The working solution is stable for at least 3 months if kept refrigerated.

**Cadmium Sulfate Solution.** Prepare a 5% aqueous solution of reagent-grade cadmium sulfate.

**Lead Acetate.** Powdered.

**Concentrated Sulfuric and Nitric Acids.** Reagent-grade nitric acid is redistilled. Reagent-grade sulfuric acid is used without further purification.

**Ion-Free Water.** Prepared by passing singly distilled water through a mixed-bed deionizing column.

*Procedures*

**Urine.** The first step in the digestion process for urine is the removal of excess water. To a suitable aliquot of sample (100 ml) in the digestion flask A (Fig. 1), are added 5 ml of conc. sulfuric acid and 5 ml of conc. nitric acid. Heat is applied to the boiling point. The first 80-90 ml of distillate collected in the receiver vessel B (Fig. 1) is discarded. The digestion flask is cooled and 20 ml of conc. nitric acid added. The contents of the flask are heated just to the appearance of sulfuric acid fumes with care to avoid excessive charring. Usually, the digest is not sufficiently clear at this point. The flask is cooled, and the contents of the receiver are reintroduced by means of the stopcock. Digestion is resumed just to the evolution of sulfuric acid fumes. If the digest is still not clear, the process is repeated. Two such steps are usually sufficient to furnish a clear, colorless digest. Particularly stubborn samples may be treated with 0.5 ml of 30% hydrogen peroxide or 0.5 ml of 70% perchloric acid. In any event, care must be exercised to remove all traces of oxidants for they have a deleterious effect on the subsequent production of the color. This is readily accomplished by the addition of 10 ml water and 0.5 gm reagent-grade oxalic acid to the clear digest. Heat is applied just to the appearance of sulfuric acid fumes.

The flask is permitted to cool and is detached from the digestion unit. The following are added in the order noted: 0.5 ml of 5% cadmium sulfate solution, 50 ml of 25% sulfuric acid, and 10 ± 0.1 gm zinc metal. The lead acetate scrubber and the absorbing column, charged with 2 ml silver diethyldithiocarbamate-pyridine reagent, are attached immediately. Bubbling is continued for approximately 1 hr. The colored end product is transferred to a 5-ml volumetric flask. Two milliliters pyridine is used to

rinse down the absorber and the gas delivery tube. The volume is made up to 5 ml with pyridine. Color intensity is read at 540 m $\mu$  for arsenic and 510 m $\mu$  for antimony. Pyridine is used as a blank. Concentrations are established by referring to previously constructed calibration curves.

**Blood.** The usual sample size is 10-20 ml of whole blood. To this are added 5 ml of conc. sulfuric acid and 5 ml of conc. nitric acid. The first 15-25 ml of distillate collected is discarded. Then 10 ml of conc. nitric acid is added, and the digestion is continued to the appearance of sulfuric acid fumes. From this point, the procedure for blood is similar to that for urine.

**Tissue and Hair.** Tissue and hair samples are treated in a manner similar to that for urine and blood except that the minced tissue (10-20 gm) or hair is permitted to stand at room temperature in 10-50 ml of conc. nitric acid for about 3-4 hr. This preliminary step minimizes frothing in the digestion process.

**RESULTS**

Recoveries of arsenic and antimony added to tissue and body fluids are shown in Table 1. In all cases recovery is good. Precision of the method is stated as standard deviation.

TABLE 1  
RECOVERY OF ARSENIC AND ANTIMONY ADDED TO VARIOUS BIOLOGIC MATERIAL

Sample	Metal added	Recovery ( $\mu$ g) and standard deviation
Urine, 100 ml	5 $\mu$ g As	4.7 ± 0.5
Urine, 100 ml	10 $\mu$ g As	9.5 ± 0.4
Blood, 10 ml	5 $\mu$ g As	4.3 ± 0.3
Blood, 10 ml	10 $\mu$ g As	9.2 ± 0.4
Liver, 20 gm	10 $\mu$ g As	9.0 ± 0.2
Urine, 100 ml	5 $\mu$ g Sb	4.8 ± 0.3
Urine, 100 ml	10 $\mu$ g Sb	9.7 ± 0.6
Blood, 10 ml	5 $\mu$ g Sb	4.5 ± 0.5
Liver, 20 gm	10 $\mu$ g Sb	9.1 ± 0.3

Analysis of urine from 30 presumably normal individuals furnished values ranging from 0 to 11  $\mu$ g/l with an average of about 4  $\mu$ g/l.

The results appearing in Table 2 represent arsenic levels in several cases of suspected arsenic intoxication. Particular attention is invited to the elevated levels found during the administration of BAL.

**DISCUSSION**

The colored complex resulting from the reaction of arsine with silver diethyldithiocarbamate in pyridine exhibits a maximum absorption at

DETERMINATION OF ARSENIC AND ANTIMONY

540 m $\mu$ ; the absorption maximum for the stibine analog occurs at 510 m $\mu$ . Both adhere closely to the Beer-Lambert law over the concentration range 0-15  $\mu$ g. The slopes for both, using this method, are approximately 0.05 O.D. unit/ $\mu$ g metal. This can be improved by making the final dilution less than 5 ml. The colors are stable for long periods, both showing only a 1% increase in % T over 8 hr.

TABLE 2  
ARSENIC FOUND IN CASES OF SUSPECTED INTOXICATION

Case No.	Sample	Arsenic found* ( $\mu$ g%)
ME 14/59HW	Urine, 100 ml before BAL	2.0
ME 14/59HW	Urine, 100 ml during BAL	5.6
ME 14/59HW	Urine, 100 ml after BAL	1.3
ME 30/59MJ	Urine, 100 ml before BAL	Negative
ME 30/59MJ	Urine, 100 ml during BAL	2.8
ME 46/59AS	Hair, 0.310 gm	3.3
ME 46/59AS	Urine, 100 ml	13.2

\* Average of duplicate analyses (except for hair).

The reagent itself possesses a maximum at 420 m $\mu$  but shows negligible absorbance (98% T) at 540 and 510 m $\mu$ .

The interference of oxidizing agents has already been mentioned. Hydrogen sulfide seriously affects the color but is removed by the lead acetate scrubber. Excessive moisture also interferes; thus the absorbing column must be thoroughly dry prior to use.

Sandell (7) reports that the presence of various metals inhibits the evolution of arsine and stibine. In the present study, no interferences due to copper, iron, cobalt, nickel, etc. normally present in tissue urine and blood were noted. The effects of platinum have been well described (2), but the probability of encountering platinum in biologic media in large enough concentrations is remote.

If antimony and arsenic are present together in comparable concentrations, they may be determined simultaneously by obtaining readings at both 540 and 510 m $\mu$ . Two equations are set up and are solved simultaneously. However, if one metal is present in much greater quantities, a preliminary separation by established techniques (7) becomes necessary.

Deposits on Reinsch wires may be washed off using the methods of Gettler and Kaye (8) and subjected to this procedure. In this manner, both qualitative and quantitative information on the nature of the deposit is available.

Experiments are in progress to ascertain the feasibility of using the absorbing column for the determination of other volatile substances of toxicologic importance.

SUMMARY

A method for the estimation of arsenic and antimony in biologic material is presented. It involves the evolution of arsine and stibine into a pyridine solution of silver dithiocarbamate. The resulting color (s) are read spectrophotometrically. A new absorbing column is described which increases sensitivity and facilitates cleaning. Results are tabulated showing the excellent sensitivity and precision attained with the technique. Results of actual Medical Examiner cases are also presented.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are deeply indebted to Walter Matusiak of Fordham University for his many helpful suggestions during the course of this work.

REFERENCES

1. VASAK, V., AND SEPAVEK, V., *Chem. listy* 46, 341 (1952).
2. LEIBERMAN, D., BOWEN, J. E., AND MILLNER, O. I., *Anal. Chem.* 31, 2052 (1959).
3. POWERS, G. W., JR., MARTIN, R. L., PHEL, F. J., AND GRIFFIN, J. M., *Anal. Chem.* 31, 1589 (1959).
4. ALBERT, D. K., AND GRANATULLI, L., *Anal. Chem.* 31, 1583 (1959).
5. BERRIG, P. O., *Anal. Chim. Acta* 10, 317 (1954).
6. UMBREGER, C. J., Ph.D. Thesis, New York University, 1939.
7. SANDELL, E. B., "Colorimetric Determination of Traces of Metals," 3rd Ed. Interscience, New York, 1959.
8. GETTLER, A. O., AND KAYE, S., *J. Lab. Clin. Med.* 35, 146 (1950).

## ANEXO Nº 5.1

### **MÉTODOS TRADICIONALES DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

#### Métodos físicos tradicionales

##### **Remediación de suelo por extracción**

Entre las técnicas de extracción más conocidas están el “Soil Washing” ó lavado de suelos, que se realiza habitualmente en depósito. Se basa en una separación o una reducción del volumen. El rendimiento depende de la solubilidad de los compuestos contaminantes en la solución de lavado que se utilice. Otra de las técnicas es conocida como “Soil Vacuum”. Se produce una extracción de los contaminantes y se utiliza para eliminar compuestos orgánicos volátiles y mercurio. Para potenciar la eficacia se puede utilizar además vapor de agua.

Una modificación es la técnica de “Soil Venting”, donde se combina el efecto de extracción con la inyección de aire. En este tipo de técnicas las características físicas y químicas del suelo pueden alterar la eficacia de la técnica.

##### **Remediación de suelo por sellado**

La técnica del sellado trata al suelo con un agente que lo encapsula y lo aísla. El suelo es excavado, la zona se sella con un impermeabilizante y se redeposita el suelo. Para desarrollar las barreras de aislamiento se ha utilizado diversas sustancias, como el cemento, cal, plásticos, arcilla, etc. El procedimiento tiene el inconveniente que se pueden producir grietas por las que los contaminantes pueden fugarse. Sometiendo al suelo a altas temperaturas (1600-2300°C) se consigue su vitrificación con lo que se llegan a fundir los materiales del suelo, produciéndose una masa vítrea similar a la obsidiana. Durante el proceso hay que controlar la volatilización de numerosos compuestos.

La filosofía de estas técnicas (persigue la eliminación del suelo) las hace recomendables en situaciones extremas. En otras ocasiones se realiza el aislamiento directamente sobre los niveles de aguas freáticas y mediante bombeos exhaustivos se consigue deprimir los niveles freáticos para alejarlos del suelo y subsuelo contaminados.

##### **Remediación de suelo por incineración**

La incineración es una técnica apropiada para el tratamiento de residuos principalmente para la fracción orgánica y combustible. Esta técnica reduce considerablemente el volumen y la peligrosidad de los residuos. Sin embargo, debe considerar el tratamiento de las emisiones atmosféricas, de los residuos líquidos; así como mismo la disposición apropiada de las cenizas y escorias que se generan en el proceso.

La incineración de residuos no sólo se utiliza como una alternativa de tratamiento sino que también para el aprovechamiento del poder calorífico contenido en los residuos. Algunos procesos productivos, especialmente los de producción de cemento y de cal, presentan a nivel mundial una experiencia importante en co-incineración de residuos como combustibles alternativos, en forma complementaria al combustible tradicional. En nuestro país, algunas instalaciones ya realizan operaciones de co-incineración de residuos y en el futuro se espera que otras empresas productoras de cemento, cal y de productos forestales comiencen a utilizar residuos como combustible, debido al menor costo que implica la utilización de estos compuestos en la generación de calor.

La incineración genera emisiones atmosféricas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, en forma de gases y partículas presentando un riesgo a la salud de la población expuesta. Su dispersión puede darse a escala local y regional y su posterior deposición puede significar un riesgo al patrimonio ambiental o a otras actividades productivas.

Dependiendo de los residuos utilizados, las emisiones a la atmósfera corresponderán a partículas totales en suspensión cuya composición química puede estar formada por metales pesados y sus compuestos u otras sustancias orgánicas e inorgánicas. Asimismo, las emisiones pueden corresponder a sustancias en forma de gases, entre ellos los compuestos clorados y fluorados.

#### Métodos químicos tradicionales

Las **estrategias químicas** más utilizadas son tratamiento químico y tratamiento electroquímico.

#### **Tratamiento químico**

De acuerdo a algunos autores, el tratamiento químico es un método útil para hidrocarburos, aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, cianuros y plaguicidas organoclorados.

Éste trata de depurar el suelo mediante la degradación de los contaminantes por reacciones químicas. Frecuentemente se trata de reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos. Como agente oxidante se emplea el oxígeno y el agua oxigenada. Este tratamiento se utiliza preferentemente *in situ*, inyectando el agente depurador a zonas profundas mediante barrenas huecas, o a veces, simplemente mediante un laboreo apropiado del terreno. Otro procedimiento químico es la descloración.

Esta técnica se utilizó, en un principio, para la estabilización de productos del petróleo.

En suelos se ha empleado para la descloración de PBC. Consiste en la inyección de CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> o NaOH. El suelo al reaccionar se calienta y al aumentar el pH hasta valores de 9 a 11 se produce la descloración de los PBC.

#### **Tratamiento electroquímico**

El tratamiento electroquímico es un procedimiento a realizar *in situ*, el desplazamiento de los contaminantes se logra mediante la creación de campos eléctricos. Consiste en introducir, a suficiente profundidad electrodos en el suelo. Los contaminantes fluyen desde un electrodo a otro siguiendo las líneas del campo eléctrico. En el tratamiento de desechos peligrosos, la electrólisis se usa ampliamente para los metales como cadmio, cobre, oro, plomo, plata y cinc. La recuperación de metales por electrolisis por la electro-deposición directa, reduciendo particularmente metales. Un ejemplo específico es la remoción electrolítica de cadmio y níquel en agua contaminada por desechos de baterías usando electrodos fibrosos de carbono.

## ANEXO Nº 5.2

### DESCRIPCIÓN DE UNA ZONA O REGIÓN

#### TIPOS DE ECORREGIÓN

#### ECORREGIONES DEL PERÚ

Se ha identificado la existencia de once ecorregiones en el Perú, tomando en consideración diferentes factores ecológicos: tipos de clima, regiones geográficas, hidrografía, flora y fauna. (Dr. Antonio Brack Egg)



#### **1.- El Mar Frío de la Corriente Peruana o de Humboldt**

Abarca desde el centro de Chile hasta los 5° de latitud sur en Piura. Su temperatura baja hasta los 13° o 14° C en invierno y en verano llega a los 15° o 17° C.

Las aguas de este mar son verdes debido a la abundancia del plancton.

Se da el fenómeno de “afloramiento de las aguas”, es decir, los nutrientes de los fondos marinos son desplazados hacia la superficie. Este fenómeno se produce en una extensión de 1.500 kilómetros de largo por 60 kilómetros de ancho.

En esta ecorregión viven aproximadamente 600 especies de peces. Los más abundantes son la sardina y la anchoveta los cuales sirven de alimento a otros peces. Entre ellos destacan: el bonito, el barrilete, el jurel, la cojinova, la corvina, el pejerrey, el machete, la lorna, el borracho, la lisa y el róbalo. Existen 26 especies de delfines, así como ballenas, cachalotes, lobos y gatos marinos. Entre las aves figuran: el pingüino de Humboldt, el guanay, la chuita, el piquero, el zarcillo, la brujilla, el potoyunco y el pelicano peruano.

## **2.- El Mar Tropical**

Se extiende desde los 5° de latitud sur en Piura, hasta el sur de California en los Estados Unidos. La corriente de “El Niño” tiene una influencia crucial en esta ecorregión. Las costas de Piura y Tumbes son cálidas todo el año, las temperaturas del mar superan los 19°C y en verano llegan a más de 22° C. Las aguas tienen baja salinidad debido a las lluvias que introducen abundantes cantidades de agua dulce. Este mar no es rico en nutrientes pues no hay afloramiento, tampoco tienen tanto oxígeno debido a las temperaturas tropicales.

Los principales peces son: el tiburón bonito, los peces voladores, el atún de aleta amarilla, el merlín negro y el barrilete. Las aves típicas son el petrel gigante, la paloma del cabo, el ave fragata y el ave del trópico.

En esta ecorregión se ubica la zona de manglares. Los mangles crecen en las orillas marinas. Cuando la marea baja y las raíces se quedan expuestas, los animales terrestres van en busca de alimento. En cambio cuando la marea sube ingresan a los manglares las especies marinas, Abundan aquí las conchas negras, langostinos y cangrejos. Y el símbolo de esta zona, el cocodrilo americano o de Tumbes.

## **3.- El Desierto del Pacífico**

Abarca desde los 5° de latitud sur (Piura) hasta los 27° de latitud sur (norte de Chile) en la costa. Su ancho promedio es de 20 Km. Se caracteriza por la ausencia de lluvias, siendo su terreno desértico. Hay vegetación solo en los valles fluviales y las lomas. Estas últimas se llenan de vegetación en invierno (de mayo a octubre). Este fenómeno solo es posible en las laderas que miran hacia el mar. Por eso solo ocurren en lugares puntuales de la costa. Las lomas son producto de la condensación de las neblinas que avanzan del mar del desierto.

En los ríos de esta ecorregión abundaban los camarones, pero actualmente en casi todos los valles han desaparecido.

## **4.- El Bosque Seco Ecuatorial**

Se extiende desde el golfo de Guayaquil (0° 30' de latitud sur) hasta La Libertad (7° 40' de latitud sur). En su parte más ancha llega hasta los 150 kilómetros y alcanza los 1.500 metros de altitud. Su clima se caracteriza por una prolongada estación seca anual que puede ocupar nueve meses del año. El bosque seco ecuatorial penetra hacia el interior y se extiende sobre el piso más bajo del valle del Marañón hasta los 2.800 m.s.n.m.

La formación vegetal principal es el algarrobal y en la zona más lluviosa el ceibal, estos árboles a diferencia de los algarrobos dependen directamente de las lluvias.

## **5.- El Bosque Tropical del Pacífico**

Abarca desde el extremo norte de Tumbes hasta Costa Rica. Está cubierta por bosques siempre verdes, los árboles superan los 30 metros de altura. Es la única zona de la costa del Perú donde hay monos en su ambiente natural. Son dos especies: el mono aullador o coto de Tumbes y el mono blanco.

## **6.- La Sierra Esteparia**

Se extiende desde los 1.000 metros hasta los 3.800 metros. Desde la región de La Libertad (7° 40' de latitud sur) hasta el norte de Chile.

Las temperaturas medias oscilan entre los 6° y 12° C. A mayor altitud las lluvias son más abundantes y la vegetación más densa.

En las partes superiores a los 3.000 metros el árbol más característico es el aliso.

## **7.- La Puna**

Corresponde a las partes altas de los andes, sobre los 3.800 metros. Su clima es frío y la luz solar fuerte. El ichu es el pasto más extendido. Los vientos que soplan todo el tiempo hacen que la temperatura sea baja y el ambiente seco.

En esta ecorregión habitan las vicuñas, vizcachas, el zorro andino y el cuy silvestre. La taruca o ciervo andino es el único cérvido que llega a las partes más altas.

## **8.- El Páramo**

Se extiende desde Venezuela hasta el norte del Perú. Se ubica en las regiones de Piura y Cajamarca, en las cuencas altas de los ríos Chinchipe, Huancabamba y Quirós. (3.500 metros). Es una zona de muchas neblinas. La temperatura por las noches baja a menos 0° C. En lo que se refiere a su vegetación ésta es muy similar a la de la puna.

## **9.- La Selva Alta**

Se extiende a lo largo del flanco oriental de la Cordillera de los Andes, desde la frontera con Ecuador hasta la frontera con Bolivia, entre los 500 a 3.500 m. Su clima es muy variado.

Las lluvias pueden superar los 3.000 milímetros anuales. Los árboles son más bajos a medida que aumenta la altitud. Entre los 2.500 a 3.000 – 3.800 metros (Ceja de Selva) los árboles alcanzan sólo unos 15 metros, la humedad permite la abundancia de plantas epífitas o aéreas que crecen no solo en los árboles sino también en el suelo.

## **10.- La Selva Baja**

Corresponde a los bosques amazónicos ubicados debajo de los 600 metros de altura. Es relativamente llana. Su temperatura promedio es de 24° a 26° C.

Las altas temperaturas y humedad ambiental permiten tener la mayor diversidad de especies.

Gran parte de la fauna habita en las copas de los árboles y en menor cantidad al nivel del piso donde reina la penumbra. Son abundantes las lagunas, riachuelos y pantanos. Viven aquí lobos de ríos y el paiche, el pez más grande de la selva. Otros animales típicos son los monos, perezosos, loros y papagayos, el águila arpía y las boas.

## **11.- La Sabana de Palmeras**

Se ubica en una pequeña área de la región de Madre de Dios, en las pampas del río Heath. No existen árboles, sólo palmeras, principalmente el aguaje. Esta ecorregión se inunda en épocas de lluvias y son comunes los incendios durante la estación seca.

## ZONAS DE VIDA

Una clasificación de zonas de vida comprende los ocho grupos siguientes:

A.- DEL DESIERTO	
------------------	--

**a) Desierto Desechado (dd)**

1. *Desierto Desechado Premontano Tropical*
2. *Desierto Desechado Subtropical*
3. *Desierto Desechado Montano*
4. *Desierto Desechado Templado*

**b) Desierto Superárido (dp)**

5. *Desierto Superárido Tropical*
6. *Desierto Superárido Premontano*
7. *Desierto Superárido Subtropical*
8. *Desierto Superárido Montano*
9. *Desierto Superárido Templado Cálido*

**c) Desierto Perárido (dp)**

10. *Desierto Perárido Premontano Tropical*
11. *Desierto Perárido Subtropical*
12. *Desierto Perárido Montano Bajo Tropical*
13. *Desierto Perárido Montano Subtropical*
14. *Desierto Perárido Templado Cálido*
15. *Desierto Montano Subtropical*
16. *Desierto Perárido Montano*

**d) Desierto Árido (da)**

17. *Desierto Árido Montano Tropical*
18. *Desierto Árido Montano Subtropical*
19. *Desierto Árido Montano Templado Cálido*

**e) Desierto Semiárido (dse)**

20. *Desierto Semiárido Subalpino Subtropical*
21. *Desierto Semiárido Templado Cálido*

B.- DEL MATORRAL	
------------------	--

**a) Matorral Desértico (md)**

22. *Matorral Desértico Tropical*
23. *Matorral Desértico Premontano*
24. *Matorral Desértico Subtropical*
25. *Matorral Desértico Montano Bajo Tropical*
26. *Matorral Desértico Montano bajo Subtropical*
27. *Matorral Desértico Templado Cálido*
28. *Matorral Desértico Montano Tropical*
29. *Matorral Desértico Montano Subtropical*
30. *Matorral Desértico Montano Templado Cálido*
31. *Matorral Desértico Subalpino Tropical*
32. *Matorral Desértico Subalpino Subtropical*
33. *Matorral Desértico Subalpino Templado*

C.- DEL MONTE	
---------------	--

**a) Monte Espinoso (me)**

- 34. Monte Espinoso Tropical
- 35. Monte Espinoso Premontano Tropical
- 36. Monte Espinoso Subtropical

D.- DE LA ESTEPA	
------------------	--

**a) Estepa Espinosa (ee)**

- 37. Estepa Espinosa Montano Bajo Tropical
- 38. Estepa Espinosa Montano Bajo Subtropical

**b) Estepa (e)**

- 39. Estepa Montano Tropical
- 40. Estepa Montano Subtropical

E.- DE LOS BOSQUES	
--------------------	--

**a) Bosque Muy Seco (bms)**

- 41. Bosque Seco Tropical

**b) Bosque Seco (bs)**

- 42. Bosque Seco Tropical
- 43. Bosque Seco Premontano Tropical
- 44. Bosque Seco Subtropical
- 45. Bosque Seco Montano Bajo
- 46. Bosque Seco Montano Bajo Subtropical

**c) Bosque Húmedo (bh)**

- 47. Bosque Húmedo Tropical
- 48. Bosque Húmedo Premontano Tropical
- 49. Bosque Húmedo Subtropical
- 50. Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical
- 51. Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical
- 52. Bosque Húmedo Montano tropical
- 53. Bosque Húmedo Montano Subtropical

**d) Bosque Muy Húmedo (bmh)**

- 54. Bosque Muy Húmedo Tropical
- 55. Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical
- 56. Bosque Muy Húmedo Subtropical
- 57. Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical
- 58. Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical
- 59. Bosque Muy Húmedo Montano Tropical
- 60. Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical

**e) Bosque Pluvial (bp)**

- 61. Bosque Pluvial Premontano Tropical
- 62. Bosque Pluvial Subtropical
- 63. Bosque Pluvial Montano Tropical
- 64. Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical
- 65. Bosque Pluvial Montano Tropical
- 66. Bosque Pluvial Montano Subtropical
- 67. Bosque Pluvial Semisaturado Subtropical
- 68. Bosque Pluvial Semisaturado Bajo Subtropical
- 69. Bosque Pluvial Semisaturado Subtropical

F.- DEL PARAMO	
----------------	--

**a) Páramo Húmedo (ph)**

- 70. Páramo Húmedo Subalpino Tropical
- 71. Páramo Húmedo Subalpino Subtropical

**b) Páramo Pluvial (pp)**

- 72. Páramo Pluvial Subalpino Tropical
- 73. Páramo Pluvial Subalpino Subtropical

**c) Páramo Muy Húmedo (pmh)**

- 74. Páramo Muy Húmedo Subalpino Tropical
- 75. Páramo Muy Húmedo Subtropical

**d) Páramo Pluvial Semisaturado (pps)**

- 76. Páramo Pluvial Semisaturado subalpino Subtropical.

G.- DE LA TUNDRA	
------------------	--

**a) Tundra Húmeda (th)**

- 77. Tundra Húmeda Alpino Subtropical
- 78. Tundra Húmeda Alpino Templado Cálido

**b) Tundra Muy Húmeda (tmh)**

- 79. Tundra Muy Húmeda Alpino Subtropical

**c) Tundra Pluvial (tp)**

- 80. Tundra Pluvial Alpino Tropical
- 81. Tundra Pluvial Alpino Subtropical

H.-DEL PISO NIVAL	
-------------------	--

- 82. Nival Tropical
- 83. Nival Subtropical
- 84. Nival Templado Cálido

ZONAS DE CARÁCTER TRANSICIONAL: BOSQUES

- 1. Seco (t) a Húmedo (pt)
- 2. Seco (t) a Húmedo (st)
- 3. Húmedo (t) a (pt)
- 4. Húmedo (t) a muy Húmedo (pt)
- 5. Húmedo (t) a muy Húmedo (s)
- 6. Húmedo (t) a muy Húmedo (t)
- 7. Muy Húmedo (t) A Pluvial (pt)
- 8. Matorral Desértico de (pt) a (t)
- 9. Monte Espinoso de (pt) a (t)
- 10. Seco de (pt) a (t)
- 11. Húmedo de (pt) a (t)
- 12. Muy Húmedo de (pt) a Húmedo (t)
- 13. Muy Húmedo de (pt) a Pluvial (t)
- 14. Pluvial (pt) a muy Húmedo (t)
- 15. Seco (s) a Húmedo (s)
- 16. Húmedo de (s) a (t)
- 17. Muy Húmedo (s) a Pluvial

## ANEXO Nº 5.3

### CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La clasificación de suelos es un tema complejo y controvertido, existiendo en la actualidad un gran número de clasificaciones de mayor o menor desarrollo, y basadas en criterios muy diversos. La más usual es la de FAO/UNESCO de 1990, que establece una clasificación básica con 28 **Grupos Principales** de Suelos, que en 1998) han introducido profundas modificaciones en su esquema de clasificación desarrollando el "World Reference Base for Soil Resources".

Otra clasificación muy seguida es la denominada "Soil Taxonomy", establecida por el *Soil Survey Staff* de los Estados Unidos, y que identifica 11 grandes categorías.

Clasifica los suelos por nomenclatura de: *Orden – SubOrden - Grandes Grupos – SubGrupo – Familia – Series*

### TIPOS DE SUELO

TIPO	HORIZONTES, RASGOS CARACTERÍSTICOS	FERTILIDAD	DISTRIBUCIÓN
Vertisol	Ninguno. Alto contenido de arcilla hinchable	Buena	Pastizales de regiones estacionalmente secas (p.ej., India, Sudán, Texas)
Inceptisol	Incipiente; se forma en superficies de terrenos jóvenes	Variable	En todo el mundo; más común en regiones montañosas
Aridisol	Diferenciado, especialmente el horizonte de arcilla	Buena con riego	Regiones desérticas de todo el mundo
Mollisol	Diferenciado, con horizonte de gruesa superficie orgánica oscura	Excelente, especialmente para cereales	Grandes praderas, pampas argentinas, estepas rusas
Espodosol	Diferenciado, con concentraciones de materia orgánica, Al y Fe.	Buena, especialmente para trigo	Bosques septentrionales de Norteamérica y Europa
Entisol	Diferenciado, altamente lixiviado con horizonte de arcilla ácida	Deficiente, requiere fertilizantes	Subtrópicos húmedos, p.ej. SE de EEUU, India, SE asiático
Oxisol	No diferenciado, con tonos vivos rojos y amarillos debidos a minerales de Fe	Deficiente, requiere fertilizantes	Trópicos húmedos: cuencas del Amazonas y del Congo
Histosol	No diferenciado, drenaje deficiente, el más alto contenido en materia orgánica	Variable	Regiones húmedas, tanto frías (turberas) como cálidas
Alfisol	Formados en superficies jóvenes, reservas de arcilla	Buena	Suelos rojos
Andisol	Suelos de ceniza volcánica	variable	Pocos lugares, suelo negro volcánico.
Características de los principales tipos de suelos establecidos en <i>Soil Taxonomy</i>			

## **CAPACIDAD DE USO DE LOS SUELOS**

El término "capacidad de uso del suelo" se refiere al potencial de un suelo como recurso para desarrollar diferentes cultivos y formas de agricultura. Para su determinación se toman en consideración y se relacionan las propiedades de los suelos, las características topográficas del terreno, el clima, los requerimientos del cultivo y uno o varios niveles tecnológicos de referencia.

Los proyectos de manejo integrado de cuencas pueden introducir cambios en la capacidad de uso de los suelos, por ejemplo, mediante la introducción de prácticas de conservación de los mismos, la construcción de obras para el control de inundaciones o el mejoramiento de las condiciones de drenaje. Por otro lado, iniciativas como la ejecución de desarrollos urbanos en áreas de alto potencial agrícola, o de desarrollos agrícolas en zonas de vocación forestal contribuirán a disminuir el potencial de estos recursos.

### **CAPACIDAD DE USO MAYOR DEL SUELO**

Fuente: ECOLOGÍA DEL PERÚ - Por: Antonio Brack y Cecilia Mendiola  
Estudio Nacional de la Diversidad Biológica - DGANPE, INRENA, 1997

El Ministerio de Agricultura y las Regiones son las entidades encargadas de clasificar los suelos según su capacidad y controlar el buen uso. El usar las tierras sin tomar en consideración su vocación conduce a serios problemas (derrumbes, huaycos, erosión, destrucción de carreteras, casas, puentes, muertes, pérdida de tierras agrícolas, etc). En nuestro país existe un total desorden en este aspecto y la degradación de los pocos suelos buenos es alarmante.

Para garantizar el buen uso de los suelos se han clasificado las tierras del Perú según su capacidad de uso mayor, que se basa en las posibilidades permanentes de los suelos para poder mantener actividades agrícolas, pecuarias o forestales dentro de márgenes económicos.

Los factores que fijan estas posibilidades, están determinadas también por limitaciones tales como: condiciones climáticas o bioclimáticas dominantes; los riesgos de erosión determinados por la topografía y pendiente; las características del suelo en si, tales como: propiedades físicas, morfología, salinidad, alcalinidad, fertilidad y otros aspectos propios que inciden en la productividad; y las condiciones de drenaje o humedad definidas por la presencia de niveles freáticos elevados, peligro de inundaciones, presencia de capas densas poco permeables en el subsuelo.



*Suelos Altoandinos (Marisel Allende)*

El **Sistema de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor**, fue establecido por el Reglamento de Clasificación de Tierras, según D.S. No. 0062/75-AG, del 22 de enero y su ampliación fue establecida por ONERN. Esta clasificación proporciona un sistema comprensible, claro, de gran valor y utilidad a las normas de conservación de suelo. El Sistema de Clasificación según su Capacidad de Uso Mayor establece tres categorías: Grupo, Clase y Subclase.

## Grupos

Esta categoría representa la más alta abstracción, agrupando tierras de acuerdo a su máxima vocación de uso. El sistema considera cinco grupos de capacidad de uso mayor:

**Grupo A:** Tierras Aptas para Cultivo en Limpio: El Perú dispone de 4 902 000 ha. (3.81% del territorio nacional) de tierras aptas para cultivo en limpio, distribuidas en sus tres regiones naturales continentales. En la costa existen, principalmente en los valles irrigados, donde ocupan la mayor parte de su superficie. En la Sierra, se les encuentra en zonas de topografía suave y fondos de valles abrigados; y en la Selva, en las terrazas de formación reciente a lo largo de los principales ríos. Precisamente, gracias a la calidad de sus suelos y al clima favorable a lo largo del año, los valles de la Costa contribuyen actualmente con aproximadamente 50% del producto agrícola nacional.

Por su alta calidad agrícola, estas tierras pueden destinarse también a la fijación de cultivos permanentes, pastos o a la producción forestal, cuando en cualquiera de estas formas se obtenga un rendimiento económico superior al de su utilización con fines de cultivo en limpio o cuando el interés del Estado así lo exija.

**Grupo C:** Tierras Aptas para Cultivos Permanentes: Cubren reducida superficie del país, aproximadamente 2 707 000 ha. (2,11% del territorio nacional), se distribuyen en las tres regiones naturales continentales, siendo significativa su extensión en la Costa y en la Selva. En la Costa (496,000 ha), se ubican principalmente en las cabeceras de los valles irrigados y en algunas pampas o desiertos ínter fluviales. En la Sierra (20,000 ha), se encuentra en algunos valles de topografía relativamente suave; y en la Selva (2,191,000 ha), en ciertos valles de la Selva Alta y en lomadas y terrazas de los valles del llano amazónico.

**Grupo P:** Tierra Aptas para Pastoreo: Ocupan el tercer lugar en cuanto a extensión abarcando aproximadamente 17 916 000 ha., es decir 13,94% de la superficie territorial del país. Las extensiones, más vastas, referidas esencialmente a pastos naturales, se localizan en las regiones alto andinas principalmente, sobre 3 500 m.s.n.m. En la Costa, aparecen en las "lomas", así como asociadas con bosques de algarrobos en los departamentos de Piura y Lambayeque. En la Selva, son bosques naturales que reúnen condiciones topográficas y ecológicas favorables para su transformación en pastizales cultivados o naturalizados para poder mantener una actividad pecuaria permanente y económicamente productiva. El área con mayor potencial de pastos naturales en el Perú, es la región alto andina.



*Tierras de pasturas (Manuel Mavila)*

**Grupo F:** Tierras Aptas para Producción Forestal: Las tierras aptas para producción forestal, son las más representativas del país. Alcanzan 48 696 000 ha., es decir, alrededor de 37,89% de la superficie territorial. Se localizan fundamentalmente en la vertiente oriental boscosa, comprendido 46 432 000 ha de Selva Alta y Selva Baja o llano amazónico.

La Sierra (2 092 000 ha) tiene una significativa proporción de tierra con aptitud forestal que es necesario utilizar con fines de producción y/o de protección, para salvaguardar las cuencas y prevenir la intensa erosión hídrica, además de proporcionar material energético (leña).

En la Costa (172 000 ha), se dispone del bosque seco del noroeste, que se extiende a través de los departamentos de Tumbes, Piura y Lambayeque, principalmente en los dos primeros.



*Plantaciones forestales. Porcón, Cajamarca. (M. Allende)*

**Grupo X:** Tierras de Protección: Constituyen todas aquellas tierras que no reúnen las condiciones ecológicas mínimas requeridas para cultivos intensivos, permanentes, pastoreo y producción forestal. Se incluye dentro de este grupo a los picos nevados, pantanos, playas, causes de río y otras tierras que pueden presentar vegetación diversa, herbácea, arbustiva o arbórea, pero cuyo uso no es económico ni ecológicamente recomendable. La superficie territorial que abarca este grupo de tierras es de 54 300 560 ha., es decir, 42.25% del territorio nacional, distribuidos 10 207 000 ha en la Costa, 25 169 000 ha en la Sierra, y 18 924 560 ha en la Selva.

### **Clases**

Son una categoría establecida sobre la base de la calidad agrológica del suelo y que refleja la potencialidad y grado de amplitud de las limitaciones para uso agrícola. Es la síntesis que comprende la fertilidad, condiciones físicas del suelo, relaciones suelo-agua y las características climáticas dominantes.

Se consideran tres clases de capacidad de uso:

Clase de calidad agrológica alta (1)

Clase de calidad agrológica media (2)

Clase de calidad agrológica alta (3)

### **Subclase**

Categoría establecida en función de los factores limitantes y riesgos que restringen el uso del suelo por largo tiempo.

Se han reconocido seis factores limitantes;

Limitación por suelo (s)

Limitación por sales (l)

Limitación por inundación (i)

Limitación por topografía - erosión (e)

Limitación por drenaje (w)

Limitación por clima (c)

## **CLASES DE COBERTURA DEL SUELO**

**Cobertura del suelo.**- Capa de materiales como paja, turba, compost, etc que se extiende sobre la superficie de un terreno para conservar la humedad y evitar que crezcan las malas hierbas. En jardinería, es la capa de materiales como paja, turba, o compost que se extiende sobre la superficie de un terreno para conservar la humedad y evitar que crezcan las malas hierbas.

Técnica para mantener la humedad

La cobertura del suelo, sea esta con láminas plásticas o desechos vegetales, es un trabajo que se debe realizar. Las ventajas de su implementación se ven en el mantenimiento de la humedad del suelo, se evita la erosión y, a la vez, las gotas de lluvia no golpean las hojas de las plantas luego de caer al suelo.

La cobertura del suelo, especialmente con filmes de polietileno, es una técnica que en nuestro país se está empleando con mucho éxito, y cada año va ganando mayor número de adeptos, principalmente entre los horticultores.

El material utilizado para la cobertura debe ser liviano, barato, disponible en el lugar, de fácil manejo, libre de semillas de malezas y, preferiblemente, biodegradable. Cada material potencialmente útil para cobertura tiene ventajas y desventajas con relación a los requisitos citados. La utilización de láminas de polietileno simple o revestido por otra de papel son frecuentemente citados en la literatura técnica y, de hecho, están muy difundidos en los países donde la mecanización agrícola está bien desarrollada, ya que, mediante adaptaciones apropiadas de las máquinas, es posible la rápida aplicación y retirada de las coberturas plásticas. Sin embargo, estos materiales son relativamente caros y no son biodegradables.

### **Cobertura orgánica**

La cobertura con residuos orgánicos de origen vegetal o animal constituye una opción interesante por ser de bajo costo, de fácil adquisición, dependiendo de la zona y, principalmente, porque tales residuos orgánicos son biodegradables. Algunos materiales disponibles en nuestro país, y que pueden ser de interés local, son: el bagazo de caña de azúcar de las destilerías de alcohol y aguardientes, trapiches, azucareras; la cascarilla de arroz disponible en las cercanías de los ingenios arroceros; la cascarilla de algodón, la viruta de carpintería, el aserrín de madera; las hojas de la caña de azúcar que sobran después de la cosecha.

No hay que confundir cobertura del suelo con incorporación de materia orgánica al suelo. En la agricultura extensiva, esta práctica se realiza mediante el cultivo, con ese propósito, de plantas conocidas como "abonos verdes", tales como la mucuna, crotalaria, lupino, avena negra, entre otros, capaces de producir gran volumen de rastrojos, cobertura vegetal muerta que queda sobre la superficie, sobre la cual se practica la siembra directa de rubros comerciales extensivos.

En horticultura, siendo generalmente de superficies menores, la cobertura del suelo se puede realizar con materiales generados o disponibles en otros lugares y colocados en el lugar y en el momento deseados, según las características de cada cultivo.

Aun cuando las coberturas orgánicas se descompongan y, una vez incorporados, adicionan pequeñas cantidades de nutrientes al suelo; la función fertilizadora de las coberturas no debe ser considerada.

## Efectos de la cobertura del suelo

La cobertura del suelo se usa principalmente con los objetivos de conservar la humedad del suelo, regular la temperatura y controlar las malezas, la erosión y hasta algunos patógenos del suelo. La cobertura hecha con material orgánico o con filmes de polietileno actúa como una barrera que disminuye la tasa de evaporación, evitando el rápido desecamiento del suelo. Ayudan también a mantener la superficie del suelo friable, a disminuir la percolación del agua, impidiendo la lixiviación de los nutrientes hacia capas más profundas del suelo, y a aumentar la capacidad de absorción en la capa superior del suelo. El humus adicionado al suelo, a través de la cobertura orgánica, mejora sus propiedades físicas tales como la estructura, textura, aireación y capacidad de retención de agua. Además de proporcionar mayor cantidad de nutrientes disponibles para las plantas, atributos que son importantes por estimular la actividad radicular y microbiológica.

La cobertura ayuda a mantener uniforme la temperatura del suelo, reduciendo las fluctuaciones diurnas y nocturnas que ocurren en la superficie.

En el verano, la temperatura del suelo bajo cobertura es disminuida en virtud del aislamiento, de la absorción de calor y del sombreado proporcionado por la cobertura; en el invierno, un suelo cubierto presenta temperatura más elevada que un suelo desnudo. La cobertura funciona como aislante que conserva el calor del suelo e impide el drástico enfriamiento y calentamiento, disminuyendo el daño a las raíces, lo cual es importante para las plantas de enraizamiento superficial, como son las hortalizas.

**Agronomía** (del latín *ager*, 'campo', y del griego *νόμος*, *nomos*, 'ley'), denominada también como ingeniería agronómica, es el conjunto de conocimientos de diversas ciencias aplicadas que rigen la práctica de la agricultura y la ganadería. Es la ciencia cuyo objetivo es mejorar la calidad de los procesos de la producción agrícola fundamentada en principios científicos y tecnológicos; estudia los factores físicos, químicos, biológicos, económicos y sociales que influyen o afectan al proceso productivo. Su objeto de estudio es el fenómeno complejo o proceso social del agroecosistema, entendido éste como el modelo específico de intervención del hombre en la naturaleza, con fines de producción de alimentos y materia prima.

Agronomía, *f.* En general, ciencia de la agricultura. Estrictamente, ciencia que estudia las condiciones físicas, químicas y biológicas aplicables al cultivo de las plantas y al perfeccionamiento general de la agricultura. (V. agricultura.)

Diccionario Enciclopédico Vol 1. © 2009 Larousse Editorial, S.L.

## ANEXO Nº 5.4

### CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS

- **Familia** (*nombre científico*), Especie, Nombre común.

- **Partes de la planta:** raíz, tallo, hojas, inflorescencia, fruto.

- **Origen** de las Especies:

**Nativas**, especies vegetales de una zona (región, país, continente, etc.), cuya área de distribución natural, sin mediar intervención del hombre, incluye el territorio aludido, formando parte de las diferentes comunidades vegetales naturales.

**Endémicas**, especies vegetales cuya área de distribución natural queda enteramente comprendida dentro de un territorio definido (ya sea éste político o biogeográfico).

**Introducidas**, especies foráneas (naturalizadas) que se multiplican espontáneamente y forman parte de las comunidades vegetales naturales de una región.

- Según las **formas de vida de las plantas**, sistema de clasificación botánica de RAUNKIAER (1934) basado en la **morfología** y **posición de los nodos de crecimiento** (yemas de renuevo) de las plantas en temporada desfavorable:

**Terófitas**, carecen de yemas de renuevo. Anuales y efímeras, de dominancia estacional, cuyos ciclos vitales no exceden el año y cuyos órganos de activación del crecimiento consisten en embriones seminales o semillas, los que soportan en esa forma períodos desfavorables. Frecuentes en zonas áridas y con lluvias estacionales.

**Criptófitas**, perennes con yemas de renuevo bajo tierra con partes aéreas anuales.

**Geófitas** (campos secos hasta húmedos no uliginosos)

**Helófitas** (campos paludosos o uliginosos)

**Hidrófitas** (lagos, ríos, etc.)

**Hemicriptófitas**, herbáceas perennes con yemas de renuevo dispuestas al ras del suelo. La parte aérea muere todos los años después de la fructificación y las yemas de renuevo quedan protegidas por la hojarasca y detritos vegetales.

**Caméfitas**, especies perennes con la base leñosa y persistente, epigea que soportan los brotes del crecimiento anual, los que no exceden los 30 cm sobre el suelo. Esta forma de vida está principalmente representada por los arbustos bajos propios de muchas zonas áridas y semiáridas, tanto cálidas como frías.

**Fanerófitas**, especies leñosas medianas y altas cuyos puntos superiores de crecimiento anual se ubican sobre los 30 cm del suelo.

**Nanofanerófitas:** tallos ramificados desde la base.

**Microfanerófitas:** yemas de renuevo a menos de 8 m de altura.

**Mesofanerófitas:** yemas de renuevo a 8 - 30 m del suelo.

**Megafanerófitos:** yemas de renuevo a más de 30 m del suelo.

**Lianas**, plantas trepadoras.

**Epífitas**, plantas que se apoyan sobre otras, sin nutrirse de ellas.

**Parásitas**, plantas que se apoyan sobre otras, que se nutren de ellas.

**Suculentas**, plantas carnosas.

- **Condiciones de cultivo**

- **Frecuencia de producción** (semestral, anual, bianual, perenne)

- **Variedades**

## ANEXO Nº 5.5

### EXTRACCIÓN DE ARSÉNICO EN SUELOS Y PLANTAS

#### SUELOS

##### Digestión ácida

(I) Se realiza la digestión de 0,1 g de suelo molido con 20 mL de **ácido nítrico concentrado y 10 mL de ácido sulfúrico** 15 N. Luego de la oxidación completa de la materia orgánica y de producidos los humos de trióxido de azufre, las muestras se enfrían y diluyen a 50 mL con agua deionizada. (*Problemática del arsénico en la llanura sudeste de la provincia de Córdoba. Biotransferencia a leche bovina; Pérez Carrera, A.; Fernández Cirelli, A. In Vet (B. Aires) v.9 n.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires ene./dic. 2007*).

(II) Se pesa 0.5 g de muestra de suelo (1 g en plantas) y se le añade 12 mL de ácido nítrico concentrado. A continuación se calienta a 180°C en digestor durante dos horas. Se deja enfriar, se trasvasa a un erlenmeyer y se evapora hasta 1 mL en un baño de arena. Después se añaden 5 mL de ácido perclórico concentrado y se deja evaporar a sequedad en el mismo baño de arena. El residuo se diluye con agua destilada y se filtra con papel lavado a los ácidos aforándose a 50 mL. (*Tesis Doctoral: EFECTOS RESIDUALES Y ACUMULATIVOS PRODUCIDOS POR LA APLICACIÓN DE COMPOST DE RESIDUOS URBANOS Y LODOS DE DEPURADORAS SOBRE AGROSISTEMAS MEDITERRANEOS DEGRADADOS. Juan Carlos García-Gil Gallego Centro de Ciencias Medioambientales Madrid, 2001*).

- **Método de Maxwell**, 1968.- Se ataca las muestras vía digestión ácida, usando una mezcla de ácidos fluorhídrico y perclórico.

- **Método de Berrow y Stein**, 1983.- Se emplea el método de extracción con reflujo con la mezcla ( $\text{HCl}:\text{HNO}_3$  2:1 v/v).

- **Método de Risser y Baker**, 1990.- Suelos con contenido escaso de materia orgánica: Se pesa 1 g de suelo y se añade 20 mL de la mezcla ácida ( $\text{HNO}_3$  65%: $\text{HClO}_4$  69% :: 1:1). Se coloca en un digestor Kjeldahl y se lleva a una temperatura de 210 C por 90 minutos. Se filtra y enrasa a un volumen de 100 mL.

- **Método EPA Nº 3052**.- En un vaso de teflón se pesa 0,3 g de suelo, se añade 3 mL de **HF** 40% y 9 mL de  $\text{HNO}_3$  65%. Se calienta en un horno microondas por 5 minutos de 0 C a 180 C (700 Watts) y durante 10 minutos a 180 C. Se filtra y se enrasa a 50 mL con ácido bórico.

Con este procedimiento se disminuye la volatilización del arsénico y otros elementos como Cd, Pb, Sb, Se y Tl.

#### PLANTAS

##### Método de extracción ácida

##### Digestión nítrico-perclórica (Método de Soon, 1998)

A la muestra (0,5 g de material vegetal seco) colocada en un erlenmeyer de 50 mL, se añade 3 mL de **ácido nítrico concentrado** y se digiere durante 12 horas.

Después se calienta durante 1 hora, a una temperatura máxima de 150 °C, hasta oxidación total. Posteriormente, se agrega 1 mL de **ácido perclórico concentrado**, calentando a 200° C durante 1 hora más, hasta que el líquido queda transparente. Se enrasa en fiola de 50 mL y se conserva en refrigeración hasta su análisis.

#### □ **Extracción con metanol:**

Se pesa alrededor de 2 gr. de muestra, en tubos de centrifugas de 50 ml. Después se añade 20 mL de metanol, el tubo se sella herméticamente y se agita mediante un mecanismo Shaker por 2 hrs. El extracto, así obtenido, se centrifuga a 2000 r.p.m. por 20 minutos y el líquido sobrenadante se extrae con una jeringa. Se añade 40 mL de metanol al residuo de extracción, el tubo se sella herméticamente y se pone en agitación por 15 hrs. a 25 – 30 °C en un mecanismo de agitación. Después de la extracción el tubo se centrifuga a 2000 r.p.m. por 10 minutos y el sobrenadante se extrae con una jeringa. Los extractos obtenidos se mezclan y someten a evaporación a temperatura menor a los 40 °C hasta sequedad, el residuo luego se redissuelve con 25 mL de HCl 0,01 mol/L y se ajusta a pH menor a 2 con HCl 4 mol/L. La solución acidificada se guarda en la heladera para su posterior análisis.

#### **Mineralización por calcinación en mufla.**

A los gramos pesados de material seco (0,25 g) se le añaden 5 mL de HNO<sub>3</sub> (50 % v/v), 1 mL de la mezcla de Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (20% m/v) y MgO (2% m/v), mezclándose bien los componentes. Luego se evapora en baño de arena hasta total sequedad a temperatura de aproximadamente 130° C. Este residuo seco se lleva a mufla siguiendo el siguiente programa de temperatura: 150 °C por 1hr., 200 °C por 30 min., 250 °C por 1 hr., 300 °C por 3 hrs., 350 °C por 30 min. y 450 °C durante 12 a 14 hrs. hasta ceniza blanca. La misma se disuelve en 2 mL HNO<sub>3</sub> 50 % (v/v), se lava con agua destilada y se filtra con papel Whatman N° 1 , posteriormente se lleva a un volumen de 50 mL en matraz aforado.

#### **Extracción enzimática**

##### Tripsina

Se pesa 3 muestras de 0,4 - 0,5 g. de material seco en tubo de homogeneizar. Se añade 100 mg de tripsina en pequeños volúmenes de disolución tampón bicarbonato de amonio 0.1 M (pH 8), hasta volumen final de 15 mL. Se homogeneiza bien con varilla metálica con punta de teflón. La mezcla homogénea de reactivo y muestra se transfiere a tubos de teflón, éstos se tapan y sumergen en un baño de agua a 37 °C, con agitación, durante 12 hrs. El extracto se filtra y transfiere a matraces de 50 mL y se llevan a volumen con disolución tampón. El extracto obtenido se guarda en heladera para su análisis.

##### Celulasa

Se pesa tres muestras de 0.4 - 0.5 g. de material seco en el tubo de homogeneizar con 250 mg. de celulasa y se agregan pequeños volúmenes de disolución tampón de Acetato de Amonio 0.02 M (pH = 5) hasta volumen final de 15 mL. Se mezclan los reactivos y se transfiere la mezcla a tubos de teflón que se colocan en un baño de agua a 37 °C, con agitación, durante 12 hrs. El extracto se filtra y transfiere a matraces volumétricos de 50 mL y se lleva a volumen con disolución tampón. El extracto obtenido se guarda en heladera para su análisis.

##### Pancreatina

Se pesa tres muestras de 0.25 g. de material seco en el tubo de homogeneizar, se añade 250 mg. de pancreatina y disolución tampón de bicarbonato de amonio 0.1 M (pH = 8) hasta volumen final de 15 mL. Operando de igual modo que los casos anteriores (tripsina y celulasa).