



# Jornada Internacional sobre el impacto ambiental del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica

Lima, Perú  
26, 27 y 28 de setiembre de 2001

Auspicio:  
CYTED  
GAMA (COSUDE, MEM)  
CONCYTEC, CONAM



## TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA DISMINUIR LA CONTAMINACIÓN OCASIONADA POR MERCURIO EN LA MINERÍA DEL ORO

*Freddy Pantoja Timarán, Ph.D.*  
CORPONARIÑO-COLCIENCIAS. A.A. 1476. Pasto, Colombia  
[fpant-ct@col2.telecom.com.co](mailto:fpant-ct@col2.telecom.com.co)

---

### RESUMEN

Es conocido que el mercurio tiene un alto poder contaminante y que es utilizado ampliamente en la pequeña minería del oro en Latinoamérica, muchas veces sin las precauciones necesarias causando un gran efecto contaminante tanto en las aguas y terrenos como en los propios trabajadores que manipulan el mercurio y sus familias.

Por otra parte esta técnica es casi la única posible de beneficiar esos minerales ya que es la que requiere menor tecnología y menos inversión de capital, por lo que es previsible que continúe utilizándose durante mucho tiempo. Aunque se están introduciendo dispositivos artesanales que disminuyen la contaminación, tales como las retortas de destilación para la amalgama, en el propio proceso de amalgamación se siguen produciendo grandes pérdidas de mercurio.

Se demuestra como con un lavado previo del mineral a tratar con detergentes o agentes alcalinos y la utilización de mercurio activado electrolíticamente se pueden disminuir grandemente las pérdidas de mercurio en comparación con los métodos usuales y al mismo tiempo lograr un aumento de la recuperación del oro que será el motivo que impulse a los mineros a su utilización.

Se demuestra también como es preciso, para lograr la menor contaminación posible, determinar la proporción de mercurio/mineral a utilizar y en tiempo de amalgamación óptimo lo que puede hacerse con unos sencillos tanteos.

Las pérdidas de mercurio (si se utilizan retortas en la destilación de la amalgama) en el proceso de amalgamación se concentran fundamentalmente en los residuos sólidos ya que en las aguas utilizadas en el proceso solo va normalmente de una centésima a una milésima parte de lo que se encuentra en los sólidos o menos, por lo que realmente los sólidos constituyen la fuente mayor de contaminación sobre todo con vistas al futuro. Por ello, la posible concentración gravimétrica previa y amalgamación posterior de los concentrados se ofrece como una vía paliativa de este problema reduciendo el volumen de residuos y facilitando su deposición segura o tratamiento.

Todas estas acciones no requieren equipamientos costosos ni grandes conocimientos y mejoran la recuperación del oro, por lo que pueden tener una importante acogida por parte de los mineros y ser realmente efectivos en disminuir la contaminación ocasionada por esta actividad.

### PALABRAS CLAVE

Oro, mercurio, amalgamación, contaminación, concentración.

## INTRODUCCIÓN

La técnica de la amalgamación se utiliza aún con profusión en la explotación del oro a pequeña escala, especialmente en países en vía de desarrollo de zonas tropicales del mundo debido a su sencillez y razonable eficacia, pero sobre todo, por la poca inversión de capital.

En el proceso de amalgamación, el oro es atrapado por el mercurio en el seno de una pulpa acuosa para formar una sustancia altamente viscosa y de color blanco brillante, denominada amalgama. La recuperación final del metal precioso se realiza mediante un fuerte calentamiento de la aleación (evaporación del mercurio) o la utilización de ácido nítrico (disolución del mercurio).

Para que el oro se amalgame tiene que estar en contacto con el mercurio, por lo que el oro incluido en otras sustancias (como por ejemplo sulfuros y cuarzo) no puede ser extraído hasta que se logre una molienda tal que libere las partículas metálicas y permita su contacto con el mercurio. Se amalgaman el oro y algunos minerales del mismo que son aleaciones de oro con otros metales como electrum, propecita, amalgama natural, pero no se amalgaman otros minerales de oro, especialmente en compuestos con telurium como pueden ser la silvanita y la calaverita.

La utilización inadecuada del mercurio en estas explotaciones conduce a la producción de altas pérdidas, tanto en forma de mercurio elemental durante el beneficio del mineral, como en forma de gas (vapor de mercurio) y compuestos inorgánicos durante la separación oro-mercurio. Otra parte importante y común para todas las pequeñas minas es el bajo nivel de recuperación del metal precioso a causa de la deficiente aplicación de la amalgamación.

Los riesgos sobre la salud humana y el medio ambiente no son tenidos en cuenta por la población minera que ignora los daños que puede ocasionar un mal manejo del mercurio. La exposición a esta sustancia no se limita a los trabajadores, sino que se extiende a sus familiares, ya que en muchos casos los mineros y los comerciantes destilan la amalgama en la cocina o en el patio de sus casas.

El mercurio, una vez absorbido por el hombre pasa al torrente circulatorio y atraviesa fácilmente las membranas celulares y se acumula en el hígado, intestinos, riñones, tejido nervioso y vísceras en general. La exposición crónica al mercurio produce la famosa enfermedad profesional conocida con el nombre de mercurialismo o hidrargirismo.

En el medio ambiente, el mercurio emitido por la minería aurífera se acumula principalmente en forma de mercurio metálico ( $Hg^0$ ) y compuestos de  $Hg^+$  y  $Hg^{++}$  como sucede con el nitrato de mercurio producido en la separación química de la amalgama, en los sedimentos de los ríos y suelos, donde por la acción bacteriana y bajo ciertas condiciones, se puede convertir en mercurio orgánico, especialmente metilmercurio. Esta forma de mercurio de gran toxicidad para el ser humano puede acumularse en los organismos acuáticos y pasar al hombre, por ejemplo, al consumir pescado contaminado.

Sin embargo, la preocupación más urgente esta relacionada con la salud de los mineros y sus familias por estar expuestos permanentemente al mercurio. En este sentido, las situaciones de mayor peligrosidad (y en las que el mercurio puede fácilmente penetrar en las personas) que se han registrado en todas las explotaciones de la región son:

- La exposición a los vapores de mercurio metálico durante el procesamiento de la amalgama a fuego abierto ("quema de la amalgama").
- La manipulación del mercurio metálico y la amalgama sin ninguna protección durante las diferentes etapas del proceso.

Algunos datos que reflejan la importancia de esta problemática en Iberoamérica son las siguientes:

- En la minería del sur de Colombia se emiten entre 3 kg a 10 kg de mercurio por un kilogramo de oro producido. Como valor medio se puede tomar 5 kg de Hg por 1 kg de Au obtenido.
- Las minas primarias en Brasil y Bolivia que utilizan mercurio directamente en los molinos, para realizar molienda y amalgamación simultáneas pierden entre 5 kg a 10 kg de mercurio (en casos extremos hasta 25 kg) para recuperar 1 kg de oro.
- En la minería aluvial, las fugas son casi iguales a las anteriores, cuando el mercurio se añade directamente a la grava aurífera in situ, o en un recipiente mezclador previamente a la canaleta o

directamente dentro de está. Venezuela, Brasil y Colombia son algunos de los países donde se utilizan estos procedimientos.

- Las pérdidas promedio que ocasionan los mineros informales de Brasil o “garimpeiros” se han estimado en 2 kg Hg/kg de oro obtenido.
- Las emisiones de mercurio en el complejo amazónico se calculan en 300 toneladas al año y en 1000 a 2000 toneladas, las acumuladas hasta la actualidad en este importante ecosistema.
- La cantidad anual de mercurio perdido por aproximadamente 100.000 mineros del Ecuador se estima en 50 toneladas.

No obstante, lo anterior la amalgamación en un futuro próximo seguirá siendo el método preferido y aplicado en la pequeña minería aurífera, Por todo ello, es importante mejorar las condiciones técnicas del proceso mediante la utilización de tecnologías sencillas y equipos de fácil manejo, bajo coste y de manufactura local. Igualmente, es necesario contemplar conjuntamente el incremento de la recuperación del oro y las pérdidas de mercurio, en el sentido de que su reducción no debe ir en detrimento de la producción de metal precioso. Este hecho es muy significativo para los mineros que se decidan a participar en un proyecto destinado a minimizar las emisiones de mercurio ya que si no encuentran nada más que una disminución de sus ingresos no lo harán (para ellos los efectos de la contaminación al no ser inmediatos, carecen de importancia).

Las tecnologías y equipos que empiezan a tener acogida pero que requieren ajustarse e integrarse a un procedimiento minero-metalúrgico coherente son: la amalgamación en circuito cerrado en barril de concentrados, la destilación de la amalgama en retorta que posibilita la recuperación del mercurio y su no emisión a la atmósfera, y la activación de mercurio mediante electrólisis.

#### PARTE EXPERIMENTAL

Para el estudio experimental sobre la recuperación de oro y reducción de las pérdidas de mercurio se han utilizado muestras de mineral provenientes de las vetas “La Bruja” y “La Gruesa” de la mina de oro “Nueva Esparta”, yacimiento de tipo filoniano, localizado en el suroccidente de Colombia.

En la Tabla 1 se presentan las características principales de ambas muestras, siendo la muestra “La Bruja” un ejemplo de mineral de gran riqueza, mientras que la muestra “La Gruesa” puede constituir un ejemplo de un mineral mucho más abundante en Hispanoamérica y otras zonas del mundo.

Tabla1. Características mineralógicas de las muestras

CARACTERÍSTICA	MUESTRA	
	“La Bruja”	“La Gruesa”
Au (g/t)	317,40	44,40
Ag (g/t)	180,10	62,20
SiO <sub>2</sub> (%)	83,35	88,35
TiO <sub>2</sub> (%)	0,23	0,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,79	2,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,30	2,31
MnO (%)	0,03	0,03
CaO (%)	2,11	1,56
MgO (%)	1,34	0,89
K <sub>2</sub> O (%)	0,88	0,59
Na <sub>2</sub> O (%)	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,01
S (%)	1,35	1
Pb (%)	0,19	0,13
Zn	0,17	0,13
Pérdidas en la fusión (%)	4,64	3,50

Todos los análisis de oro de muestras sólidas (mineral bruto, colas y concentrados) se han realizado por ensayo al fuego y copelación, determinándose el contenido en oro del botón de metales preciosos, bien por ataque con ácido nítrico (previa incuación si es necesario) o por microanálisis en microsonda electrónica.

Es de destacar que el oro nativo de las muestras contiene plata en una proporción que podría hacer que realmente el mineral presente fuera “electrum” (aleación natural con aproximadamente 20 % de plata) y no oro como tal elemento. Estos análisis del contenido en oro y plata del metal precioso presente en la muestra y realizados mediante microsonda electrónica se muestran en la Tabla 2 como media de los resultados obtenidos sobre varios granos de ambos tipos de mineral.

Tabla 2. Contenido de Au y Ag en la aleación natural del metal precioso de las muestras

ELEMENTO (g/t)	MUESTRA	
	“La Bruja”	“La Gruesa”
Au	75,70	80,40
Ag	24,30	19,60

Es también importante la presencia de sulfuros como piritita, arsenopiritita, galena, etc.

Se han realizado amalgamaciones sobre los minerales naturales, previa molienda adecuada a menos de 2 mm, y también sobre concentrados de los mismos, obtenidos por concentración gravimétrica en mesa concentradora tipo Wilfley y flotación, con objeto de estudiar la influencia de estos procesos.

Todos los aparatos, productos y utensilios utilizados para el tratamiento del mineral, hasta la obtención del oro, se han elegido de forma que han sido artesanales, de bajo coste y buena disponibilidad por parte de los pequeños mineros, para que el trabajo permita obtener unos resultados que se puedan considerar extrapolables a la minería real.

La amalgamación se ha realizado mediante la técnica de “barril amalgamador”, en la cual el mercurio y el mineral están contenidos dentro de un recipiente giratorio cerrado, sin fugas de pulpa y sin la intervención directa del operador. Las principales variables de operación que se han tenido en cuenta fueron: tiempo de amalgamación, cantidad de mercurio, calidad de mercurio (normal o activado por electrólisis) y lavado previo del mineral a amalgamar.

Una de las medidas que se deben tomar para controlar la producción de “harina de mercurio” (mercurio finamente particulado), que origina pérdidas importantes de mercurio por arrastre con las colas es no realizar la molienda y la amalgamación simultáneamente en el barril, para lo cual las muestras se molieron previa y separadamente a menos de 2 mm.

La amalgama y el mercurio sobrante son recogidos por decantación y arrastre del estéril con agua. Seguidamente, se separa la amalgama del mercurio por filtrado manual a presión por un tejido (retorciendo un trozo de tejido en el que se ha embolsado la muestra mercurio-amalgama) utilizando guantes de látex y finalmente la separación del oro del mercurio se realiza por destilación en una pequeña “retorta” artesanal con cierre de rosca, de las que se están introduciendo entre los pequeños mineros para evitar la destilación en un recipiente abierto y que permite la recuperación del mercurio de la amalgama.

Para los ensayos con mercurio activado, el mercurio procedente de recuperación se somete a electrólisis en una pequeña célula, de construcción artesanal, como las que se están intentando introducir entre los pequeños mineros, consistente en un pequeño recipiente plástico que en el fondo dispone de un electrodo de grafito (cátodo) que se conecta al polo negativo de una batería de coche o una pila que proporcione entre 9 y 12 voltios. Sobre este electrodo se deposita una capa de mercurio y sobre ella se vierte una solución al 10 % aproximadamente de NaCl (sal de cocina) y en esta solución se introduce otro electrodo de grafito (ánodo) conectado al polo positivo de la batería y se hace pasar la corriente durante unos 5 minutos. De esta forma se produce en el mercurio algo de amalgama de sodio, que también reacciona con el agua para producir hidróxido de sodio e hidrógeno y que en su conjunto limpian el mercurio, especialmente de los óxidos que contiene su superficie. El mercurio activo se distingue por su fuerte brillo metálico y porque tiende a formar esferas casi perfectas cuando se le divide en gotas que coalescen rápidamente entre ellas.

Para las pruebas con mineral lavado, se somete el mineral a la acción de abundante agua en el barril con adición, sosa y detergente, decantando luego el agua de lavado antes de pasar a la amalgamación con lo que además de la limpieza y eliminación de ciertos recubrimientos de los granos, se logra trabajar a un pH alcalino que disminuye la formación de “harina de mercurio” ya que esta se ve favorecida por la presencia de sulfuros que reaccionan con las pequeñas partículas de mercurio producidas por acción mecánica, recubriéndolas de una capa de sulfuro de mercurio (HgS) y produciendo

repulsión entre ellas. En un medio alcalino se forma un complejo  $\text{HgS}^{-2}$  antes que  $\text{HgS}$  que impide el efecto de recubrimiento y repulsión de estas partículas.

Para las pruebas de flotación se ha utilizado una celda Denver Sub A de ensayo, que es un modelo a escala reducida de un equipo muy extendido, aunque más adecuado para la mediana minería que para la pequeña por la necesidad de mayores conocimientos y manejo de reactivos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de la investigación se demuestra que los mejores resultados se consiguen utilizando mercurio activo y realizando un lavado previo del mineral con álcalis o detergentes que eliminen las arcillas y las partículas ultrafinas, que limpien la superficie de los granos y que los desengrasen y que a su vez disminuyen la influencia de los minerales entorpecedores de la amalgamación como pueden ser los sulfuros. En estas óptimas condiciones, y para el mineral de "La Bruja", la figura 1 muestra la influencia de la cantidad de mercurio utilizada, expresada como kg de mercurio por tonelada de mineral, con relación a la recuperación de oro expresada como % y también con respecto a las pérdidas totales de mercurio (suma de las pérdidas en las aguas de decantación y lavado del proceso de amalgamación y las pérdidas en el residuo sólido) expresadas como gramos de mercurio por cada 100 gramos de oro producido o recuperado.

Se aprecia claramente la influencia de la cantidad de mercurio tanto en la recuperación del oro como especialmente en las pérdidas de mercurio. La cantidad óptima es de 3 kg de mercurio por tonelada de mineral, que da una recuperación del 94,2 % del oro y unas pérdidas de 2,4 g de mercurio por 100 g de oro recuperado. Con una cantidad menor de mercurio la colección de oro se hace menor para el tiempo de tratamiento dado y al mismo tiempo la amalgama se hace demasiado consistente y coalesce peor favoreciendo las pérdidas en pequeñas gotas que además arrastran oro.

Cuando la cantidad de mercurio es mayor también se produce un efecto parecido debido a que la amalgama se vuelve más líquida y hay más oportunidades de pérdidas de pequeñas gotas.

Se deduce que en cada mina es necesario un pequeño estudio para determinar la cantidad óptima de mercurio a utilizar ya que esto no solo disminuye la contaminación reduciendo las pérdidas de mercurio a un mínimo, sino que también produce un aumento de la recuperación del oro que se traduce en un mayor beneficio económico para el minero.

Otro aspecto importante es la relación entre las pérdidas de mercurio en el agua de proceso y en los sólidos residuales de la amalgamación. En la Tabla 3 se muestran estos datos para las muestras de la Figura 1.

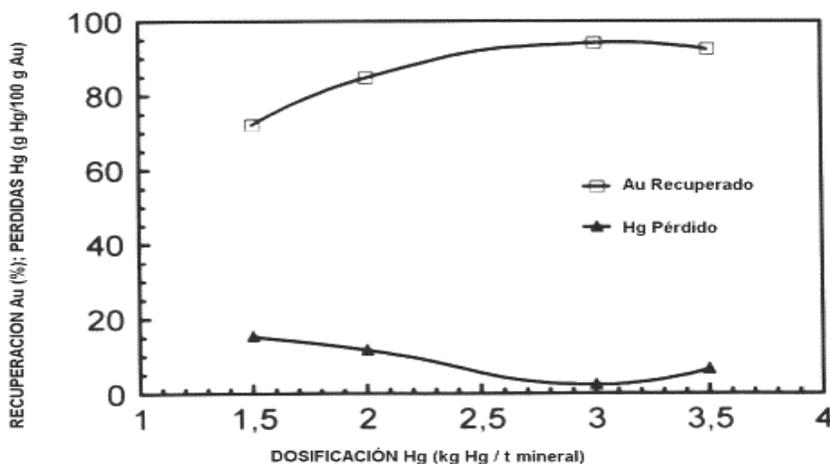
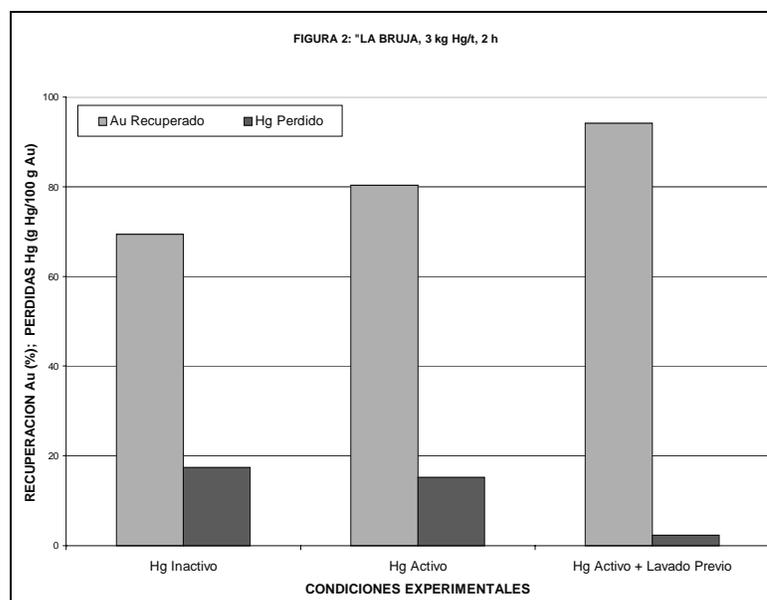


Tabla 3. Pérdidas de mercurio en las pruebas de amalgamación de “La Bruja” con mercurio activo, 2 horas y lavado previo

DOSIFICACIÓN DE Hg (Kg Hg/t)	PÉRDIDAS DE Hg (g Hg/100 g de Au recuperado)	
	EN AGUA DE PROCESO	EN RESIDUOS SÓLIDOS
3,5	0,06	6,50
3,0	0,008	2,40
2,0	0,0005	11,60
1,5	0,16	15,30

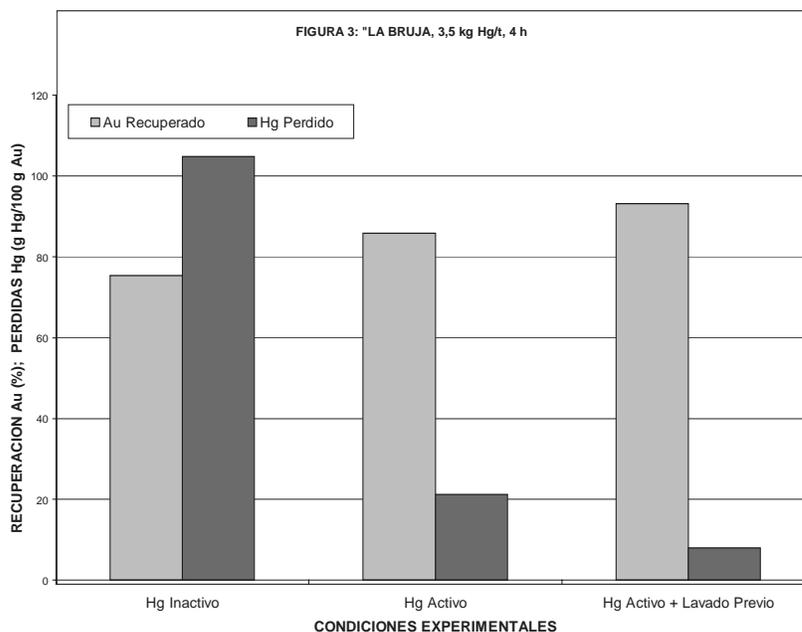
De esta Tabla 3 y de los datos de otros ensayos, que son coincidentes con estos, se deduce que las pérdidas en el agua son del orden de 100 a 1000 veces menores que en los sólidos (y a veces incluso menores todavía), con lo que el almacenamiento o deposición de estos sólidos cobra gran importancia como medio de controlar la contaminación y ahí es donde inciden las técnicas de preconcentración que disminuyendo la cantidad de mineral a amalgamar también disminuyen la cantidad de residuos sólidos contaminados a depositar o a tratar.

Las condiciones operatorias, especialmente en lo que atañe al lavado previo del mineral y a la utilización o no de mercurio previamente activado, tienen una importancia decisiva especialmente en lo que se refiere a la contaminación por mercurio y también en la recuperación de oro. En la Figura 2 se muestran los resultados de utilizar 3 kg de mercurio por tonelada de mineral que es la proporción óptima según la Figura 1, con un tiempo de amalgamación de 2 horas y en dichas diferentes condiciones operatorias.



Se observa como la recuperación del oro aumenta notablemente al pasar a utilizar mercurio activado y posteriormente al utilizar este mercurio sobre mineral previamente lavado, pero sobre todo lo que disminuye es el efecto contaminante que se reduce a una octava parte con respecto a utilizar mercurio no activado.

Este efecto beneficioso del mercurio activado y del lavado previo se mantiene aún cuando no se utilice el tiempo óptimo o las cantidades óptimas de mercurio, e incluso se podría decir que su efecto es aún mayor en estos casos. Así, en la Figura 3 se muestran los resultados para una cantidad de 3,5 kg de mercurio por tonelada y un tiempo excesivo de 4 horas que facilita las pérdidas por desmenuzamiento del mercurio y la amalgama (formación de “harina de mercurio”).



En este caso también existe una mejora en la recuperación de oro, pero las pérdidas de mercurio se reducen a la treceava parte. Las pérdidas son en todo caso mucho mayores que en la situación de la Figura 2 (2 horas y 3 kg de mercurio por tonelada) y las recuperaciones en oro algo menores, lo que muestra la importancia del tiempo de tratamiento, especialmente en la formación de "harina de mercurio"

Los resultados de los ensayos con mercurio activo, a igualdad de otras condiciones, han dado siempre mejores resultados en cuanto a pérdidas relativas de mercurio que los ensayos con mercurio normal no activado. El examen microscópico de los estériles de los tratamientos con mercurio activo, previo un intensivo bateado para concentrar los minerales pesados, mostraron menos granos finos que cuando se trata de pruebas de mercurio sin activar.

Las esferas de mercurio activo y la amalgama de oro se unen entre sí más rápida y eficientemente que en caso de mercurio no activado, evitando pérdidas de oro y requiriendo menos mercurio para su colección. La amalgama también filtra mejor y su aspecto es más sólido, con más brillo y reunido en una sola masa lo que luego facilita la formación de una esponja de oro más compacta y más fácil de extraer durante la destilación en la retorta.

Uno de los aspectos de mayor relevancia de este estudio de amalgamación es haber determinado la función que cumple el lavado previo. En este sentido, los ensayos realizados durante igual tiempo y con la misma cantidad de mercurio, activo y sin activar, produjeron mucho mejores recuperaciones de oro y relativamente menores pérdidas de mercurio cuando se sometió el mineral a una etapa previa de limpieza, operación sencilla que elimina las sustancias grasientas de la pulpa, remueve el recubrimiento o pátina que pueden tener los granos de oro y minimiza la acción de otras sustancias "entorpecedoras de la amalgamación" (sulfuros de arsénico, antimonio, bismuto, plomo, hierro, cobre, etc.) que contaminan el mercurio y que aparecen en todos los yacimientos primarios de tipo filoniano de oro, como es el caso del mineral de las vetas "La Bruja" y "La Gruesa".

Otra conclusión que se desprende de los experimentos realizados con lavado previo es que se pueden disminuir la dosificación de reactivo y el tiempo de tratamiento para obtener la misma recuperación de oro, lo cual implicaría menores costes de producción y mayores recursos representados por el oro y el mercurio recuperados, y al mismo tiempo se produce menos contaminación.

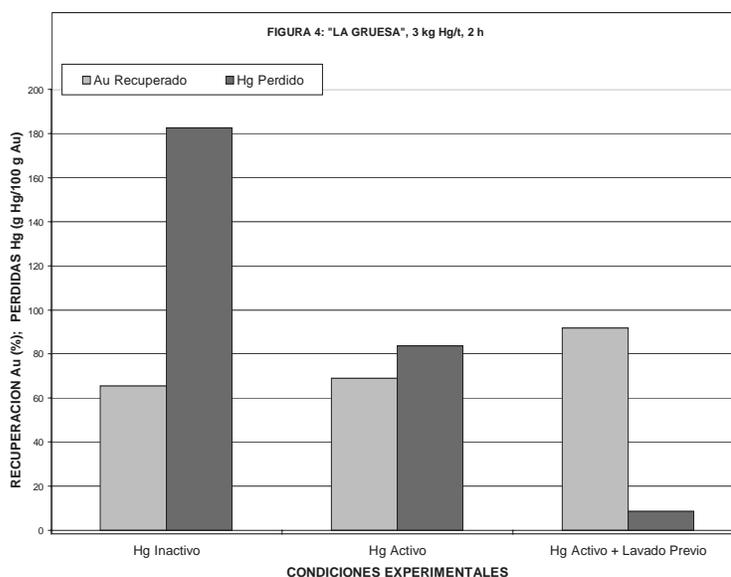
Las recuperaciones de plata son siempre menores que las obtenidas para el oro, y el contenido en plata del oro recuperado es siempre solo algo mayor que el contenido en plata de la aleación nativa oro-plata, lo que viene a demostrar que prácticamente solo se amalgama directamente la plata aleada con el oro y casi nada del resto de este metal contenido en sulfuros especialmente.

El mineral de "La Bruja", es demasiado rico en oro para ser tomado como un caso general, aunque muy ilustrativo de la eficacia de las diferentes variables de amalgamación utilizadas. El mineral de "La Gruesa", es más representativo de la mayoría de los minerales filonianos hispanoamericanos. Con el

se puede apreciar la misma tendencia, solo que al tener bastante menos contenido en oro, las recuperaciones son un poco más bajas y las pérdidas de mercurio por kg de oro recuperado algo más altas, pero que trabajando en las condiciones óptimas conseguidas (usando 3 kg de mercurio por tonelada de mineral, mercurio activo, lavado previo del mineral y un tiempo de dos horas de amalgamación) se consiguen recuperaciones del 92 % en oro y pérdidas de mercurio del orden de 8,6 g por cada 100 g de oro producido que son del orden de 20 a 100 veces menores que las pérdidas ordinarias citadas en los estudios realizados sobre el tema.

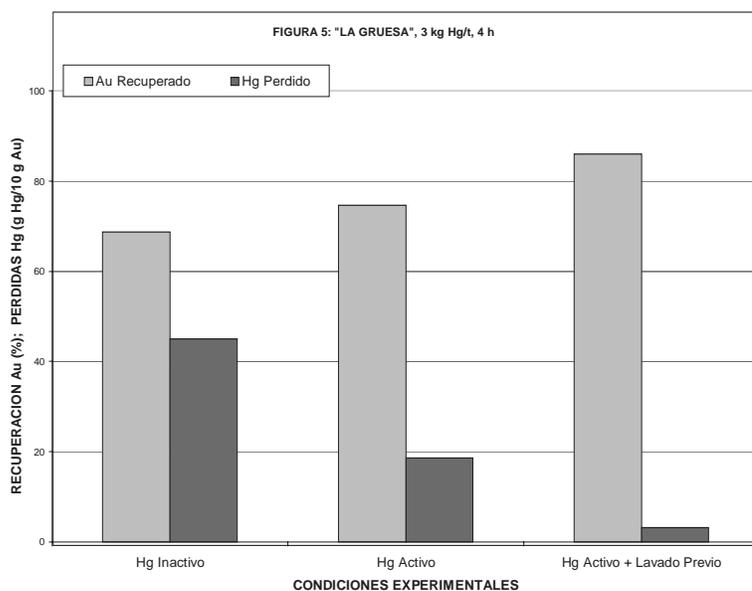
Para mostrar la influencia de la técnica utilizada se muestra en la Figura 4, el caso de utilizar condiciones óptimas en cuanto a cantidad de mercurio y tiempo de amalgamación (3 kg/t, 2 h). Se aprecia como la recuperación va subiendo hasta el 92 %, y queda a solo 2 puntos por debajo del caso de "La Bruja" y como las pérdidas de mercurio se reducen también drásticamente, aunque son mucho mayores, especialmente con el mercurio sin activar, que en el caso de "La Bruja", de forma que ha habido que ampliar la escala vertical del gráfico.

Si se utilizan condiciones no óptimas, como por ejemplo un tiempo excesivo de 4 horas (para la misma cantidad de mercurio de 3 kg/t), disminuye la recuperación de oro y se incrementan notablemente las pérdidas de mercurio, tal como se aprecia en la Figura 5, donde la escala de pérdidas se tiene que expresar ahora en g de Hg por cada 10 g de oro producido para que las alturas de las barras sea razonable. En este caso, para mercurio activo y lavado previo del mineral, las pérdidas de mercurio son de 31 g por cada 100 g de oro producido, es decir se han multiplicado por 3,6 veces en comparación con el tiempo óptimo. También la recuperación de oro ha bajado desde el 92 % al 86 % aproximadamente.



De la misma forma la utilización de cantidades no adecuadas de mercurio conduce a peores resultados. Así si se utilizan solamente 2 kg/t con el tiempo óptimo de 2 h, los resultados están dados en la figura 6, donde se aprecia una caída de la recuperación de oro, mientras que las pérdidas de mercurio siguen siendo altas (menores que con 4 horas, Figura 5, pero mayores que con las condiciones óptimas, Figura 4). Con lavado previo del mineral y mercurio activo, las pérdidas de mercurio se sitúan en 29 g por 100 g de oro producido.

Como se ha visto, la gran mayoría de las pérdidas de mercurio que se producen van con los residuos sólidos, que quedan como la mayor fuente potencial de contaminación por mercurio para el futuro y que exigirían una deposición adecuada o un tratamiento, muchas veces imposible de realizar por los pequeños mineros. Para investigar la posibilidad de reducir este factor contaminante, se ha ensayado la preconcentración en mesa concentradora tipo Wilfley, equipamiento conocido y fiable y que puede hacerse funcionar con energía eléctrica, o hidráulica por su baja potencia requerida.



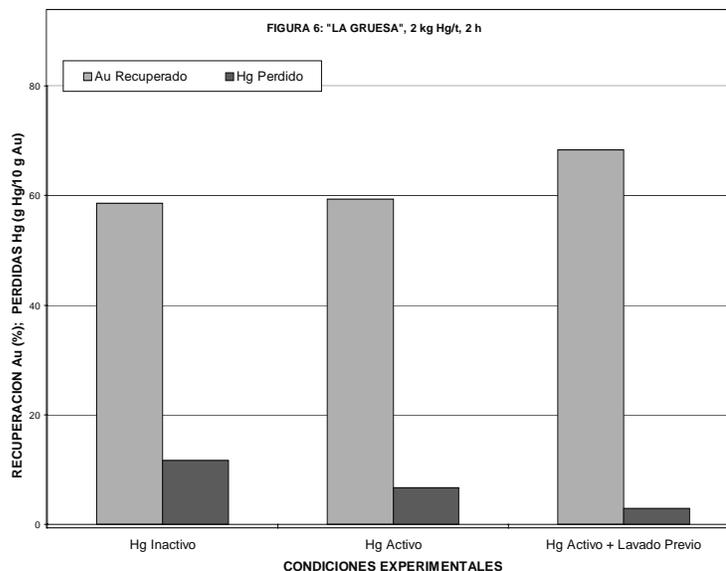
En los ensayos realizados con los minerales molidos a menos de 0,25 mm se han obtenido los resultados simplificados que se presentan en la Tablas 4, utilizando una etapa de desbaste y otra de afino, logrando producirse un concentrado de poco volumen y alta ley que podría beneficiarse por fusión directa y un segundo concentrado que es el que se ha tratado por amalgamación.

Se ve como el rendimiento o recuperación del oro en los preconcentrados es alto, especialmente en el caso de "La Bruja", por su mayor riqueza inicial y como la cantidad de sólidos se reduce considerablemente.

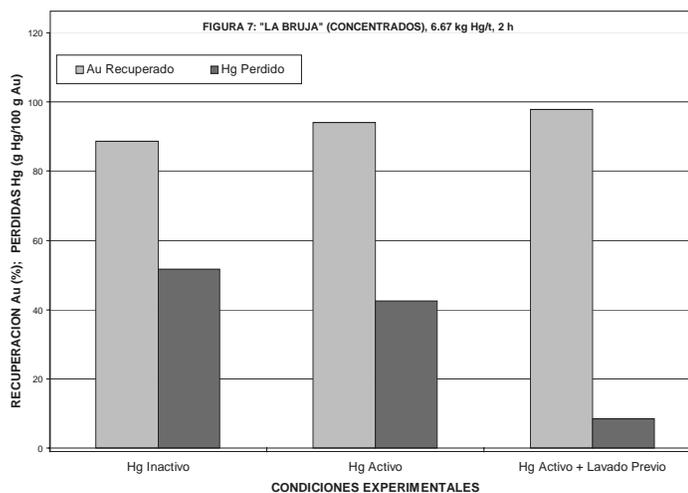
Tablas 4. Resultados de las pruebas de concentración en mesa de sacudidas tipo Wilfley

FRACCIÓN	"LA BRUJA"				
	PESO (%)	LEY (g/t)		RECUPERACIÓN (%)	
		Au	Ag	Au	Ag
1° CONCENTRADO	0,11	88,885	25,877	32,21	14,45
2° CONCENTRADO	28,22	623,20	368	63,54	52,74
RESIDUOS	71,67	17,96	90,12	4,25	32,81
TOTAL	100	303	197	100	100

FRACCIÓN	"LA GRUESA"				
	PESO (%)	LEY (g/t)		RECUPERACIÓN (%)	
		Au	Ag	Au	Ag
1° CONCENTRADO	0,04	22,594	8,256	20,75	2,55
2° CONCENTRADO	16,69	164	306	62,86	39,46
RESIDUOS	83,27	8,57	90,10	16,39	57,99
TOTAL	100	43,50	130	100	100



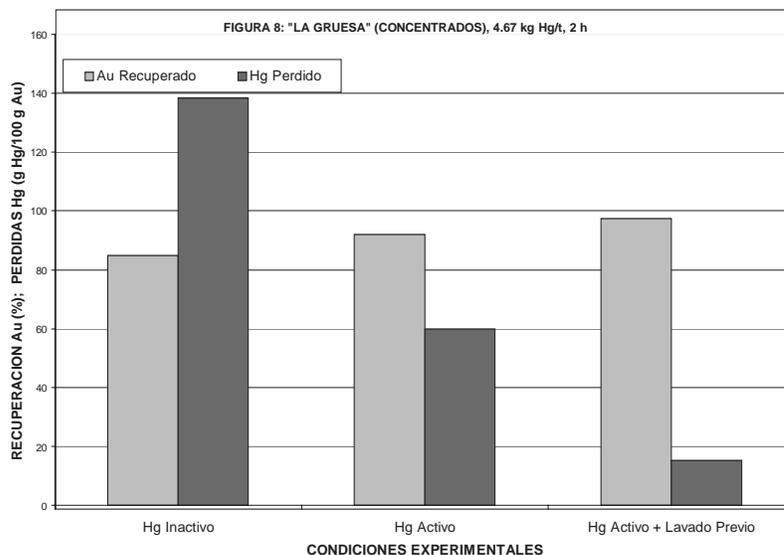
En el caso de "La Bruja" la suma de los dos concentrados alcanzan un 95,75 % de recuperación y en el caso de "La Gruesa" alcanzan un 83,61 %. En el primer caso su recuperación es mayor que en la amalgamación directa pero en el segundo caso es inferior. Los segundos concentrados de ambos minerales se han amalgamado utilizando las tres variantes de mercurio normal sin activar, mercurio activado y lavado previo del mineral. Los resultados están dados en las figuras 7 y 8 para "La Bruja" y "La Gruesa", siendo las recuperaciones en las condiciones óptimas del 97,82 % y 97,42 % respectivamente, muy buenas recuperaciones en esta fase de amalgamación. Teniendo en cuenta el proceso global concentración-amalgamación las recuperaciones quedan el 94,37 % y el 82 % respectivamente, siendo la recuperación igual que en la amalgamación directa para el mineral de "La Bruja" y menor para el mineral de "La Gruesa", por lo que en este último caso esta preconcentración no sería tolerada por los mineros.



Las pérdidas de mercurio, en las condiciones óptimas, son del orden de 8,5 g y 15 g de mercurio por cada 100 g de oro producido en la amalgamación, que si tenemos en cuenta el oro recuperado en los primeros concentrados, se quedaría en 5,6 g y 11,3 g de mercurio respectivamente por cada 100 g de oro producido por lo que son del mismo orden aproximadamente que en la amalgamación directa pero contenidas en un volumen de sólidos mucho menor, que sería un 28 % del inicial en el caso de "La Bruja" y de un 17 % en el caso de "La Gruesa", lo que facilitaría su control.

Igualmente, al realizar un balance de las ventajas de la amalgamación de concentrados provenientes de gravimetría se debe considerar que las inversiones y gastos de producción son inferiores que cuando se procesa directamente el todo-uno debido a la reducción de masa a tratar. La versatilidad y

simplicidad de la combinación de los métodos de concentración gravimétrica en mesa de sacudidas, amalgamación en barril y fundición de concentrados, sumadas a su bajo coste y gran eficacia hacen que este sistema deba ser tenido seriamente en cuenta a la hora de planificar una explotación, especialmente por la reducción del volumen de material contaminado por mercurio. No obstante, debe estudiarse en cada caso su la rentabilidad o conveniencia.



Se ha investigado la flotación como posible proceso preconcentrador aunque sea una técnica que implica mayor inversión y mayor necesidad de conocimientos. En el caso de la flotación directa sobre los minerales originales previa molienda a 0,125 mm, las recuperaciones en ambos casos son del orden del 91 %, inferiores a la amalgamación directa, aunque la masa de los concentrados se reduce al 8 %-9 % de la masa inicial, lo que es una indudable ventaja ecológica.

La flotación de las colas de la mesa de concentración, previa molienda a menos de 0,125 mm logra un concentrado que supone un aumento de la recuperación de oro de 2,5 puntos, en el caso de la "La Bruja" y de 11,42 puntos en el caso de "La Gruesa", con lo que la combinación de concentración gravimétrica y flotación mejora las recuperaciones de la concentración en mesa aisladamente y permite una importante reducción del volumen de sólidos contaminados ya que el volumen del concentrado de flotación es muy pequeño en comparación con el de mesa.

## CONCLUSIONES

En el proceso de amalgamación, el mercurio tratado electrolíticamente mediante la utilización de un sencillo equipo denominado "activador de mercurio" produce mejores resultados que el mercurio normal aumentando la recuperación de oro y disminuyendo las pérdidas del mismo y por lo tanto la contaminación.

La realización de una simple operación de "lavado previo" del mineral con detergente y alcalis, anterior a la etapa de amalgamación reduce ostensiblemente las pérdidas de mercurio e incrementa notablemente la recuperación de oro.

Una dosificación de mercurio y un tiempo de tratamiento óptimos, fácilmente deducibles en forma experimental conducen a la disminución de las pérdidas de mercurio y oro.

Una concentración gravimétrica previa a la amalgamación reduce sustancialmente la cantidad de material a procesar y por tanto la cantidad de residuos contaminados por mercurio, cuyo tratamiento y deposición final son mucho más fáciles y de menor coste que el manejo de los estériles resultantes de la amalgamación del mineral bruto (todo-uno) debiendo estudiarse en cada caso su viabilidad o conveniencia.

La amalgamación de concentrados de mesa en barril con mercurio activo y lavado previo, combinada con una dosificación adecuada de reactivo (Hg) y un tiempo óptimo de tratamiento, produce unas recuperaciones en oro prácticamente totales, que hay que corregir por la recuperación obtenida en la concentración gravimétrica, que se convierte en el controlador del proceso global.

La concentración en mesa seguida de una flotación de los residuos y amalgamación consiguiente conduce a buenos resultados pero es un sistema técnico complicado y que demanda mayores inversiones y más altos costes de operación por lo que su posible implantación es dudosa en la pequeña minería artesanal.

## BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, R. y Gomez-Limón, D., *Laboratorio de Concentración de Menas-Prácticas de Mineralurgia*, FUNDACIÓN GOMEZ PARDO-E.T.S.I.MINAS DE MADRID, España, 1995, 25-27, 30-32.

Alvarez, R., *Trituración, Molienda y Clasificación*, FUNDACIÓN GOMEZ PARDO-E.T.S.I. DE MINAS DE MADRID, España, 1996, 45-58, 69-72.

Arribas Jimeno, S., *El Inquieto y Desconcertante Mercurio*, rev. QUIMICA E INDUSTRIA, (Partes Primera a Cuarta), Madrid, España, 1993, 32-36, 165-169, 338-343, 702-707.

Bernd B.; Hentschel, T. y Priester, M., *Pequeña Minería-Técnicas y Procesos*, GATE/GTZ, Eschborn, Alemania, 1992, 236-241, 383-391.

Bodou, A. and Ribeyre, F., *Mercury and its Effects on Environment and Biology*, METALS AND IONS IN BIOLOGICAL SYSTEMS, vol. 34, Chapter 10, Siegel, A., Siegel, H. Eds., Marcel Decker, New York, 1997, 32-35.

Calvo y Calvo, F., *Cara y Cruz del Mercurio*, Instituto de España-Real Academia de Farmacia, TALLERES GRÁFICOS, Madrid, España, 1975, 44-51.

Callahan, J.; Miller, W. and Craig, J., *Mercury Pollution as a Result of Gold Extraction in North Carolina, USA*, rev. APPLIED GEOCHEMISTRY, vol. 9, 1994, 253-241.

Cossa, D., *Pescado al Mercurio*, rev. MUNDO CIENTÍFICO, No. 160, vol. 15, Madrid, España, 1995, 784-785.

CORPONARIÑO; GTZ; PROJEKT CONSULT, *Mitigación de las Emisiones de Mercurio en la Pequeña Minería Aurífera de Nariño/Colombia*, CORPONARIÑO-GTZ, Pasto, Colombia, 1992, 2-3, 13-18.

Cuadra, A.; Garcia, F.; Hernández, A.; Ayala, N. and García E., Proceedings, International Mining and Environment Congress, 1999, 1-8.

EPA, *Mercury and Arsenic Wastes*, Pollution Technology, Review No. 214, NDC, New Jersey, United States, 1992, 30-35.

Escobar, J.; Echeverri, T., *Notas sobre Minería de Veta y Cianuración*, FUNDACIÓN ESCOBAR & CIA LTDA, Medellín, Colombia, 1990, 77-89.

Español, S., *Aspectos Históricos, Medioambientales y Salud Humana*, Proceedings, Curso Internacional "El Mercurio en la Minería del Oro: Hacia una Correcta Gestión Sanitaria y Ambiental", CORPONARIÑO, Pasto, Colombia, 1997, 2-16.

Fernández-Tallante, M.; Cuadra, A. and Limpo, J., rev. METAL, Madrid, España, 1969, 6, 435-441.

Gnamus, A.; Byrne, A. and Hovart, M., rev. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2000, 3337-3345.

- Hentschel, T. and Priester, M., *Problemas Ambientales por Amalgamación y Soluciones Técnicas para la Pequeña Minería*, Proceedings, Seminario "Pequeña Minería y Medio Ambiente", La Serena, Chile, 1991, 4-6.
- Hentschel, T. and Priester, M., *Small-Scale Gold-Mining*, GATE/GTZ, Eschborn, Germany, 1992, 56-67, 81-82.
- Humble, J., *Modern Mercury Amalgamation Manual*, ACTION MINING SERVICES CO, Las Vegas, United States, 1988, 20-25.
- IEA Coal Research, *Mercury Emissions and Effect-The Role of Coal*, rev. PERSPECTIVES, IEAPRE/19, London, United Kingdom, 1995, 3-8, 24-31.
- Jackson, N., Proceedings, 1° Congreso Internacional del Mercurio, Barcelona, España, 1974, 397-492.
- Langlois, C.; Langis, R. and Perusse, M., *Mercury Pollution in Northern Quebec Environment and Wildlife*, rev. WATER, AIR AND SOIL POLLUTION 80, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995, 1021-1024.
- Lacerda, L. and Salomons, W., *Mercury in the Amazon: A Chemical Time Bomb*, Report Sponsored by the Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Nitoroi, Brasil, 1991, 8-10, 12-14, 38-40.
- Malm, O.; Pfeiffer, W.; Souza, C. and Reuther, R., *Mercury Pollution due to Gold Mining in the Madeira River Basin, Brasil*, rev. AMBIO19, Udderalla, Sweden, 1990, 11-15.
- Mallas, J. and Benedicto, N., *Mercury and Gold Mining in Brazilian Amazon*, rev. AMBIO 15, Udderalla, Sweden, 1986, 248-249.
- Martinelli, L.; Ferreira, J.; Forsberg, B. and Victoria, M. *Mercury Contamination in Amazon: A Gold Rush Consequence*, rev. AMBIO17, Udderalla, Sweden, 1988, 252-254.
- Mason, R.; Reinfelder, J. and Morel, F., *Uptake, Toxicity and Trophic Transfer of Mercury in Coastal Diatom*, rev. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, No. 3, vol. 30, 1996, 1835-1845.
- Mpendazoe, F., *Towards Sustainable Small Scale Gold Mining in Tanzania*, Proceedings, First World Environment Congress, New Dehli, India, 1993, 105-119.
- Minas de Almaden y Arrayanes, S.A., *Actuaciones Preventivas en el Campo de la Salud Laboral*, rev. QUÍMICA E INDUSTRIA, Madrid, España, 1994, 648-653.
- Neisser, W., *Estudio del Efecto Ambiental Producido por el Empleo de Mercurio en la Pequeña Minería del Oro*, Proyecto de Fin de Carrera (Postgraduate Thesis), PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima, Perú, 1995, 25-27, 32-34.
- Puche, L.; Mazadiego, L. y Martín, M., *Los Procesos de Amalgamación a través de los Tiempos*, rev. BOLETIN GEOLÓGICO Y MINERO, vol. 107, Madrid, España, 1996, 90-100.
- Pantoja, F., *Doctoral Thesis*, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID, Spain, 1999.
- Pantoja, F., *Utilización del Mercurio en la Pequeña Minería del Oro*, rev. GEOAMBIENTE, No. 42, Madrid, España, 1996, 33-36.
- Torres, F., *La Minería del Oro y su Impacto en el Medio Ambiente de las Zonas de Zaruma, Portovelo y Ponce Enríquez*, rev. TECNOLÓGICA No. 1, vol. 9, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 1994, 61-73.
- Veiga, M. and Meech, J., *Heuristic Approach Pollution in the Amazon*, Proceedings, International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes, 123 rd Congress of TMS, S. Francisco, United States, 1994, 23-38.

Wills, B.A., *Tecnología de Procesamiento de Minerales*, LIMUSA, México, 1987, 299-307, 386-395.

World Health Organization-WHO, *Methylmercury*, WHO, Geneva, Switzerland, 1990, 10-25.

World Health Organization-WHO, *Environmental Health Critic 1. Mercury*, WHO, Geneva, Switzerland, 1978, 120-131.

World Health Organization-WHO, *Inorganic Mercury*, EHC 118, WHO, Geneva, Switzerland, 1991, 159-168.

Wotruba, H.; Hruschka, F.; Hentschel, T.; Priester, M., *Manejo Ambiental en la Pequeña Minería*, MEDMIN-COSUDE, La Paz, Bolivia, 1998, 81-163.