

# Procesos de beneficio mineral, aptos para la minería en pequeña escala

(especialmente minería aurífera)

por: Hermann Wotruba, Departamento de Procesamiento de Minerales,  
RWTH Universidad de Aachen (Aquisgrán), Alemania

# Contenido

- 1 Tecnología actual de la PM/MA aurífera
  - yacimientos aluviales
  - yacimientos primarios
  - deficiencias de los procesos tradicionales de beneficio
  - ventajas de los procesos tradicionales de beneficio
- 2 Criterios para la evaluación de una solución técnica
- 3 Ejemplos de procesos y equipos de beneficio aptos y comprobados para la PM/MA
  - 3.1 Trituración y molienda
  - 3.2 Clasificación

### 3.3 Concentración gravimétrica

- Canaleta (tame, lavadero, caja, canalon, etc.)
- Jig
- Mesa concentradora
- Espiral de concentración
- Concentrador centrífugo

### 3.4 Amalgamación de concentrados

### 3.5 Flotación

### 3.6 Lixiviación por cianuro

### 3.7 Manejo de colas y aguas

# Tecnología tradicional de la PM/MA aurífera

yacimientos aluviales:

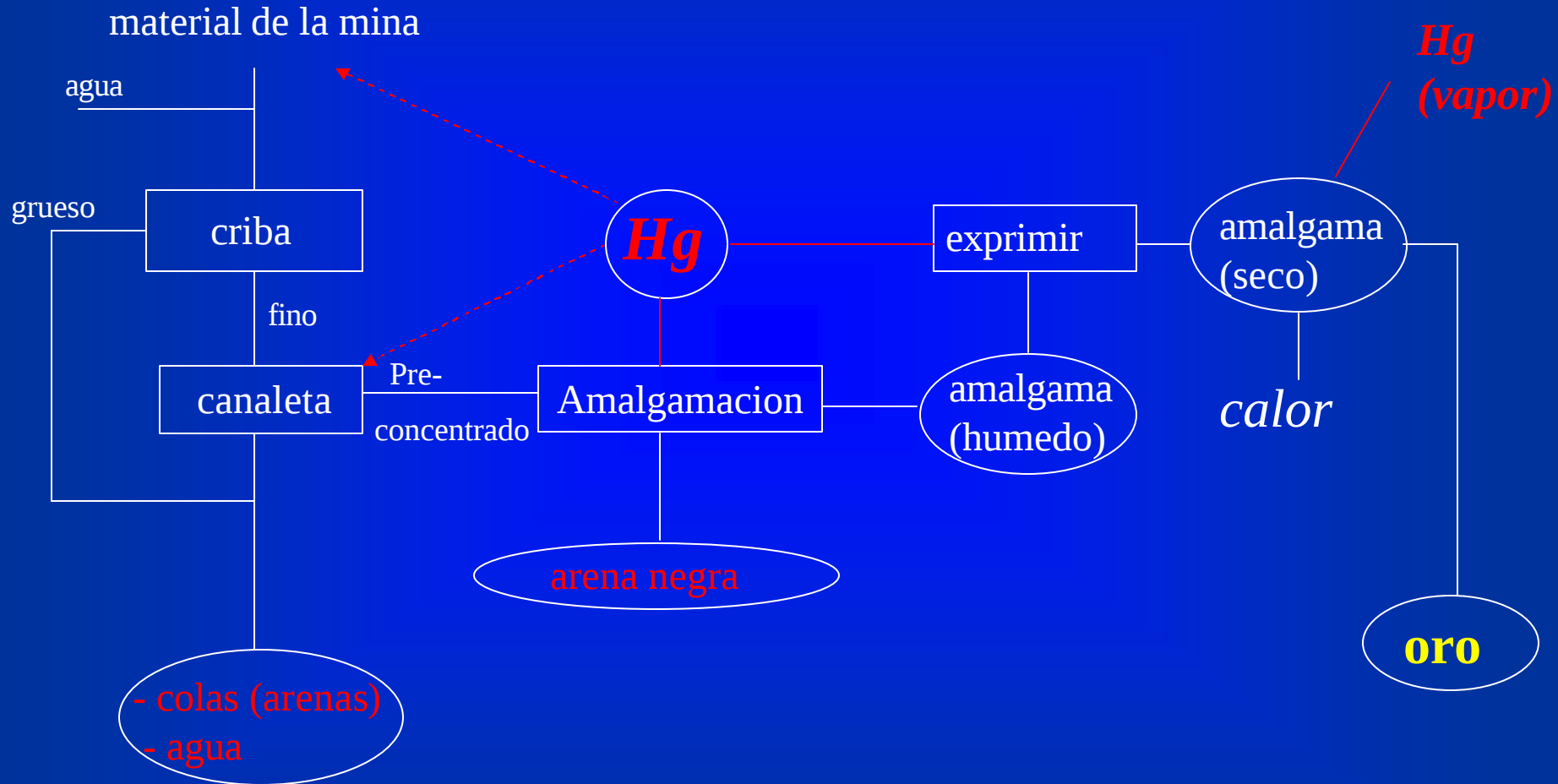
## minería:

- manualmente
- monitores/bombas de grava
- dragas/balsas
- equipo pesado  
(tractores, retroexcavadoras, etc.)

## procesamiento:

- manualmente (batea)
- canaletas
- jigs
- amalgamación
- quema de la amalgama

# Procesamiento tradicional (ejemplo; minería aluvial)



# yacimientos primarios

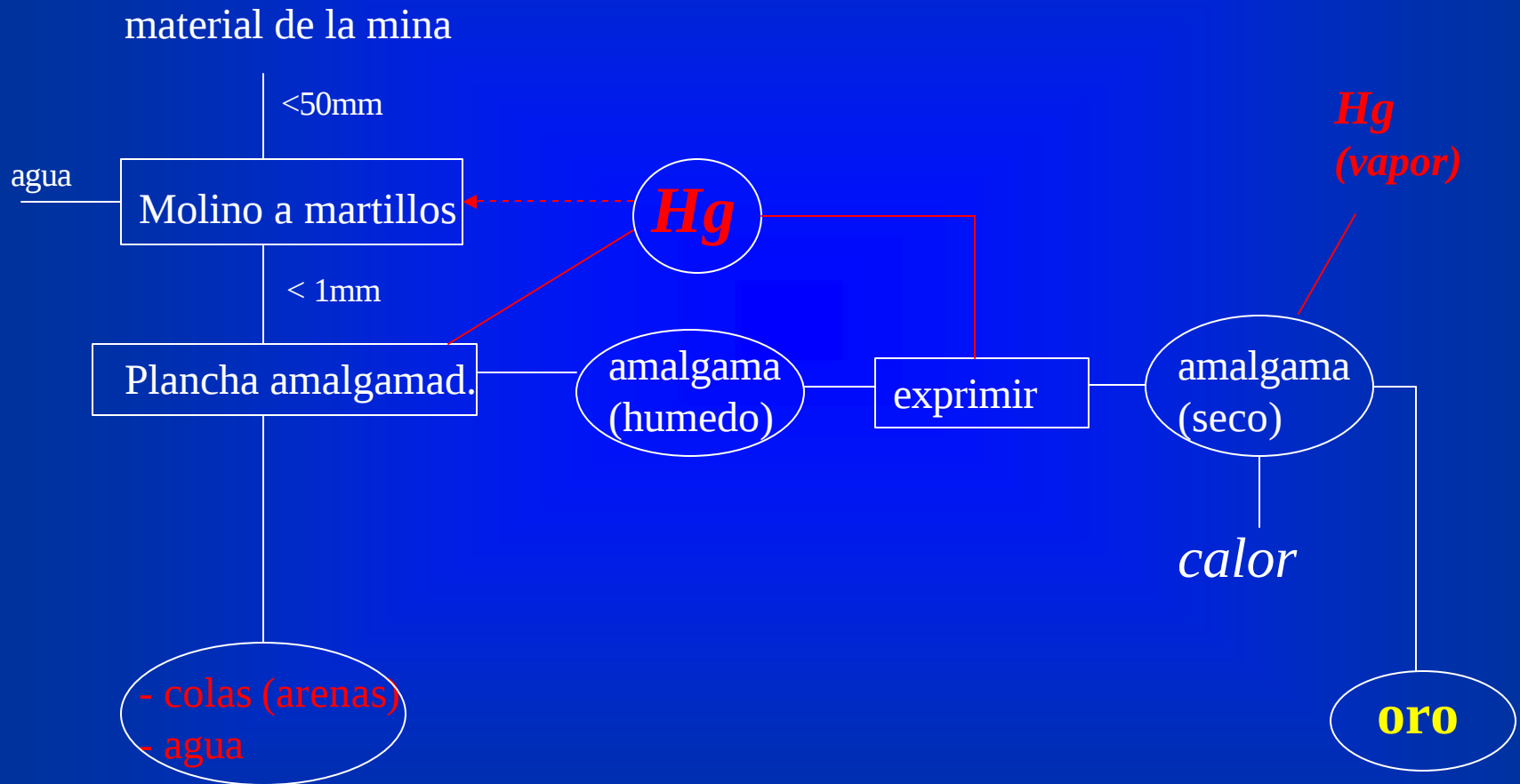
## minería

- manualmente
- perforación manual o mecanizada
- uso de explosivos

## procesamiento:

- manualmente (molinos de piedra „quimbalete“/ batea/ canaleta)
- mecanizado
  - chancadora/trituradora
  - molinos a bolas
  - molinos a martillos
  - canaletas
  - planchas amalgamadoras
  - centrífugas rústicas
  - amalgamación de los concentrados
  - quema de la amalgama
- lixiviación por cianuro
- flotación

# Procesamiento tradicional (minería primaria, simple; mercurio en circuito abierto)



# Deficiencias de los procesos tradicionales de beneficio (ejemplos)

- capacidad limitada (no en la minería aluvial)
- recuperación baja (en muchos casos)
- impactos ambientales negativos (casi siempre)
- seguridad industrial inexistente (casi siempre)
- alto costo para mercurio (en la mayoría)
- trabajo duro (casi siempre)
- limitación a materiales de alto grado (en muchos casos)
- procesos no flexibles (casi siempre)
- procesos no bien adaptados al yacimiento sino copiados del vecino (en muchos casos)

**Criticas „externas“ contra la minería en pequeña escala se concentran generalmente a los siguientes factores:**

- informalidad
- deficiente situación laboral
- **impacto ambiental**

## Impactos ambientales principales de la minería en pequeña escala (aurífera)

- emisiones de mercurio
- emisiones de sulfuros
- emisiones de metales pesados
- emisiones de sólidos a los ríos
- emisiones de cianuro y sus compuestos
- manejo inadecuado de colas/relaves y residuos
- destrucción del paisaje, de causas de ríos

# Emisiones principales de mercurio en los procesos tradicionales (1)

## - en la etapa de preconcentración y concentración en circuitos abiertos

- uso de mercurio en los frentes de trabajo (minería aluvial)
- uso de mercurio en canaletas/lavaderos/tames (minería aluvial)
- uso de mercurio en molinos (de bolas, trapiches, de martillos, quimbaletes etc.)
- uso de planchas amalgamadoras
- uso de mercurio en centrífugas

en forma de:

harina de mercurio, flóculos de amalgama, amalgama fina,  
oro parcialmente amalgamado

## **Emisiones principales de mercurio en los procesos tradicionales (2)**

- **en las colas de la amalgamación de concentrados**

(en forma de harina de mercurio, flóculos de amalgama, amalgama fina, oro parcialmente amalgamado)

- **en la quema de la amalgama**

(en forma de vapor)

- **en pérdidas por derrame (con o sin propósito)**

(en forma de mercurio líquido)

# Principales emisiones de mercurio en los procesos tradicionales de recuperación de oro (valores típicos promedios)

emisiones en procesos de (pre-)concentración  
en circuitos abiertos

1-30kg Hg/kg  
Au recuperado

emisiones en colas de amalgamación  
contaminadas

0,01-1kg Hg/kg  
Au recuperado

emisiones en procesos de separación Au-Hg  
(generalmente la quema de amalgama  
sin retorta)

0,5 – 2 kg Hg/kg  
Au recuperado

(Valores dependen del método utilizado, del tipo de mineral,  
de la experiencia de los operadores, etc.)

La amalgamación en futuro próximo seguirá el método preferido y aplicado en la pequeña minería aurífera para separar oro fino de concentrados auríferos por

- su operación fácil
- su recuperación relativamente alta
- su uso sin maquinaria ninguna o barata
- sus costos relativamente bajos

Si no se puede eliminar la amalgamación, se tiene que

- **controlarla**
- **optimizarla y**
- **restringirla a circuitos cerrados**

## **Ventajas de los procesos tradicionales de beneficio (ejemplos)**

- procesos conocidos y aceptados
- procesos simples en manejo y mantenimiento
- equipamientos baratos y de producción local
- procesos adaptados a la estructura/la cultura/los costumbres locales
- procesos adaptados al sistema de comercialización existente
- poca mecanización resulta en muchos puestos de trabajo

# Criterios para la evaluación de una solución técnica (1)

## Factores sociales y culturales

- es útil para los mineros
- es aceptada y aprobada por los mineros
- tradición en la aplicación de este componente o proceso en el país
- tradición en la aplicación de este componente o proceso por parte de los pequeños mineros de la área del proyecto
- personal operativo está disponible en calidad y cantidad
- el equipo no debe inferir con costumbres, supersticiones o creencias de los mineros
- el proceso nuevo no debe requerir cambios sustanciales
- organizativos/estructurales (de jerarquía, responsabilidades, etc.)
- el proceso/equipo es comprensible (técnicamente, organizativamente)

# Criterios para la evaluación de una solución técnica (2)

## Factores técnico-económicos

- mayor rendimiento
- mayor recuperación
- bajos costos de inversión
- bajos costos de operación
- buena seguridad en el trabajo
- los equipos deben ser compatibles entre si o con los equipos existentes, que se siguen utilizando
- posibilidad de integrar las soluciones al proceso actual
- posibilidad de fabricación local
- de fácil manejo y mantenimiento
- adecuado para las fuentes de energía disponibles
- larga vida/duración

# Criterios para la evaluación de una solución técnica (3)

## Factores de relevancia ambiental

- menor impacto ambiental directo
- mayor aprovechamiento de recursos no renovables
- en lo posible, integrado al proceso, no "end of pipe"
- la prevención tiene la prioridad antes que la curación
- rendimiento ambiental mejorado debe lograrse con poco trabajo y bajo costo
- si posible, emplear "win-win-options", es decir combinar menor impacto ambiental con ventajas económicas
- la aplicación de la solución debe tener como efecto para las empresas que se alcancen estándares ambientales y por eso la obtención de la licencia ambiental
- menores costos ambientales posteriores
- la implementación de la solución reduce o evita los conflictos entre mineros y la población (agricultores, pescadores, etc.)

Para solucionar los problemas en los procesos de beneficio tradicionales, hay que buscar y encontrar soluciones individuales

**No existen soluciones generales !**

## Aspectos generales para la implementación de medidas técnicas y técnico-ambientales (1)

- las medidas técnicas y técnico-ambientales tienen que ser adaptadas y probadas junto con los mineros y aprobadas por ellos mismos
- técnicas y procesos baratas y sencillas tienen mucho más potencial de difusión que las costosas y/o complicadas; por eso:
  - es preferible una difusión masiva de una tecnología simple, que posiblemente no soluciona el problema en su integridad, en lugar de tratar de imponer tecnologías de alta efectividad, pero de poca probabilidad de difusión
- medidas técnicas tienen que ser acompañadas por educación y capacitación del grupo meta
- es más fácil y exitoso, de optimizar tecnologías existentes y conocidas en la región que importar tecnologías nuevas

## Aspectos generales para la implementación de medidas técnicas y técnico-ambientales (2)

- se debe poner suma atención, en entender la organización de las minas y los grupos mineros, así como las relaciones socio-económicas entre mineros, dueños de minas, equipos o plantas de beneficio, compradores de mineral, vendedores de equipos o insumos, así como religión, costumbres, supersticiones, etc. del grupo meta. Generalmente, estos factores son mucho más difíciles de cambiar que asuntos técnicos.
- una medida exitosamente implementada- no importa como pequeña sea- abre la puerta para cambios más grandes
- es necesario considerar una solución integrada (protección del medio ambiente, producción, salud, energía, etc.)

## Aspectos generales para la implementación de medidas técnicas y técnico-ambientales (3)

- es indispensable ofrecer y garantizar a largo plazo el seguimiento de las medidas implementadas
- la solución debe tener la posibilidad de divulgación en la zona del proyecto
- la solución debe ser compatible con las posibilidades económicas o del financiamiento
- es de suma importancia rebasar la etapa de las "minas piloto" y entrar a la etapa de difusión masiva durante la duración del proyecto. Una sola mina piloto- por diferentes razones- no garantiza una autodifusión de las medidas.

# Ejemplos de procesos y equipos de beneficio aptos y comprobados para la minería en pequeña escala (aurífera)

- Trituración y molienda
- Clasificación
- Concentración gravimétrica
  - Canaleta (tame, lavadero, caja, canalon, etc.)
  - Jig
  - Mesa concentradora
  - Espiral de concentración
  - Concentrador centrífugo
- Amalgamación de concentrados
- Flotación
- Lixiviación por cianuro
- Manejo de colas y aguas

# Trituración y molienda

## Chancadora de mandíbulas

capacidad: 0-1000t/h

tamaños aptos para PM: 8' x 12' (20cm x 30cm) o más grande

- apto para producción local
- de fácil operación y mantenimiento
- es casi indispensable en el caso del uso de un molino a bolas
- ayuda en el caso del uso de otros molinos

## **Molinos**

- molino de pisones (stamp mill)
- molino chileno (Trapiche)
- molino a bolas
- molino de martillos

# **Molino de piones („Stamp Mill“)**

capacidad: 50-90kg por oro y pison (generalmente tiene 4 piones, resulta en ca. 5-9 t / 24h)

## **Ventajas:**

- apto para producción local
- puede trabajar con rueda de agua
- tamaño de alimentación hasta 100mm (depende del peso de los piones)
- puede trabajar con material duro
- apto para operación „batch“

## **Desventajas:**

- capacidad baja (especialmente para molienda fina)
- produce mucho ruido y vibraciones

## **Molino chileno (Trapiche)**

capacidad:           entre 3 y 25 t / 24h

### **Ventajas:**

- apto para producción local (regional)
- puede trabajar con rueda de agua
- tamaño de alimentación hasta 100mm (depende del tamaño y peso de las ruedas)
- puede trabajar con material duro
- apto para operación „batch“

### **Desventajas:**

- costo para un molino grande relativamente alto

# Molino a bolas

capacidad: 0-500t/h

tamaños aptos para PM: 2" x 3" (60cm x 90cm), ca. 5t/24h  
3" x 4" (90cm x 120cm), ca. 15t/24h  
(capacidad depende de la dureza del mineral,  
del tamaño de alimentació y del producto)

## Ventajas:

- para material duro
- puede moler muy fino (p.ej. para flotación,  $< 150\mu\text{m}$ )
- operación continua
- apto para producción local (regional)

## Desventajas:

- require alimentación  $< 20\text{mm}$
- peligro de sobremolienda (recomendable usar circuito de molienda)
- aplasta el oro
- ensucia la superficie del oro con hierro
- no apto para operación „batch“
- bolas difícil de conseguir en países no mineros
- costo de inversión alto

# Molino de martillos

capacidad (de los usados con agua): hasta 120 t /24h o 5t/h (los más grandes)  
normalmente dos tamaños:

„H 33“ con ca. 17 t / 24h o 700kg/h

„H 48“ con ca. 60 t/ 24h o 2,5 t/h

## Ventajas:

- apto para producción local
- tamaño de alimentación hasta 60mm
- forma del oro bueno para concentración gravimétrica
- apto para procesos „batch“
- liviano y fácil de mover
- precio bajo en relación a la capacidad

## Desventajas:

- no para molinda muy fina con material duro
- costos de operación relativamente altos (en martillos)

# Clasificación

## Cribas estaticas

ejemplos para el uso:

- eliminar material fino antes de una chancadora
- eliminar material grueso antes de una canaleta (minería aluvial)

## Cribas vibradoras

ejemplos para el uso:

- eliminar material grueso antes de una canaleta (minería aluvial)

## Cribas „Trommel“

ejemplos para el uso:

- eliminar material grueso y lavar el material en la minería aluvial
- en la salida de molinos a bolas para un circuito de molienda



## Clasificadores espiral

ejemplos para el uso:

- con molinos a bolas en circuitos de molienda
- separar material sólido de las colas (almacenamiento en seco)

## Spitzkasten (o Cono)

ejemplos para el uso:

- clasificar material saliendo de un molino a diferentes tamaños para luego alimentarlo a varios equipos de concentración gravimétrica
- para deslamar, p.ej. antes de equipos de concentración gravimétrica
- para clasificar material antes de la lixiviación (grueso a la percolación; fino a la agitación)

## Hidrociclón

ejemplos para el uso:

- para deslamar, p.ej. antes de equipos de concentración gravimétrica
- para clasificar material antes de la lixiviación (grueso a la percolación; fino a la agitación)

# Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es la más adecuada para la minería en pequeña escala, porque

- no usa reactivos de ningún tipo
- es generalmente de fácil manejo
- tiene costos de operación bajas
- sirve para una gran variedad de minerales (oro, wolframita, tantalita, cassiterita, sulfuros, diamantes, etc.)
- tiene una variedad de equipos de todo tamaño y capacidad
- el agua del proceso puede ser reciclado después su clarificación

En la minería aurífera a pequeña escala, para garantizar una buena producción y eliminar el uso de mercurio en circuito abierto, lo más adecuado es la optimización de los procesos de concentración gravimétrica

(o dejar completamente el uso de mercurio y trabajar con cianuración)

Los equipos de concentración gravimétrica más aptos para la minería en pequeña escala son:

- canaletas (canelones, lavaderos, tames, etc.)
- jigs
- mesas concentradoras
- espirales
- (concentradores centrífugos)

# Canaleta (tame, lavadero, caja, canalon, etc.)

## Ventajas:

- muy bajo costo
- gran capacidad (en minería aluvial)
- fabricación local
- no necesita motor
- fácil operación
- buena recuperación de oro fino (en caso de un buen diseño y manejo)
- alto grado de concentración
- recupera también oro sucio o parcialmente entrecrecido
- apto para limpiar colas de amalgamación

## Desventajas:

- necesita mucha mano de obra
- baja recuperación de sulfuros auríferos en minería primaria
- descarga del concentrado en forma discontinua

# Ejemplos para el uso de canaletas (1)



## Ejemplos para el uso de canaletas (2)



## Ejemplos para el uso de canaletas (3)



# Jig (mecánico)

## Ventajas:

- versátil
- fabricación local
- alta capacidad (apto para minería aluvial)
- bajo costo
- buena recuperación de oro y minerales pesados acompañantes, como sulfuros en la minería primaria, diamantes en la minería aluvial
- recupera también oro sucio o parcialmente entrecrecido
- buena recuperación de oro laminado
- descarga del producto en forma continua

## Desventajas:

- requiere mano de obra experimentada para su operación
- requiere motor
- requiere agua limpia

# Ejemplo para el uso de jigs



# Mesa concentradora o vibradora

## Ventajas:

- permite obtener una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)
- comportamiento visible del material sobre el tablero
- gran flexibilidad
- buena recuperación de oro y de sulfuros
- manejo y supervisión relativamente simple
- alto grado de enriquecimiento
- apto para limpiar colas de amalgamación
- descarga de los productos en forma continua
- fabricación local posible en talleres experimentados

## Desventajas:

- costo relativamente alto en relación a su capacidad  
(por esto, mayor uso en la segunda o tercera etapa de concentración)
- requiere alimentación constante y supervisión continua
- difícil recuperación de oro laminado
- requiere motor (eléctrico)

# Ejemplos para el uso de mesas concentradoras (1)



## Ejemplos para el uso de mesas concentradoras (2)



# Espirales de concentración

## Ventajas:

- permite obtener una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)
- comportamiento visible del material
- buena recuperación de oro fino y de sulfuros
- manejo y supervisión simple
- descarga de los productos en forma continua
- alta capacidad (hasta 50t/d para un espiral simple)
- no requiere motor

## Desventajas:

- necesita material de alimentación menos 1mm
- bajo grado de enriquecimiento (por esto, mayor uso en la preconcentración)
- necesita altura de 4m entre alimentación y descarga (natural o con bomba)
- producción local muy difícil

# Ejemplos para el uso de espirales (1)



## Ejemplos para el uso de espirales (1)



# Concentrador centrífugo tipo Knelson, Falcon

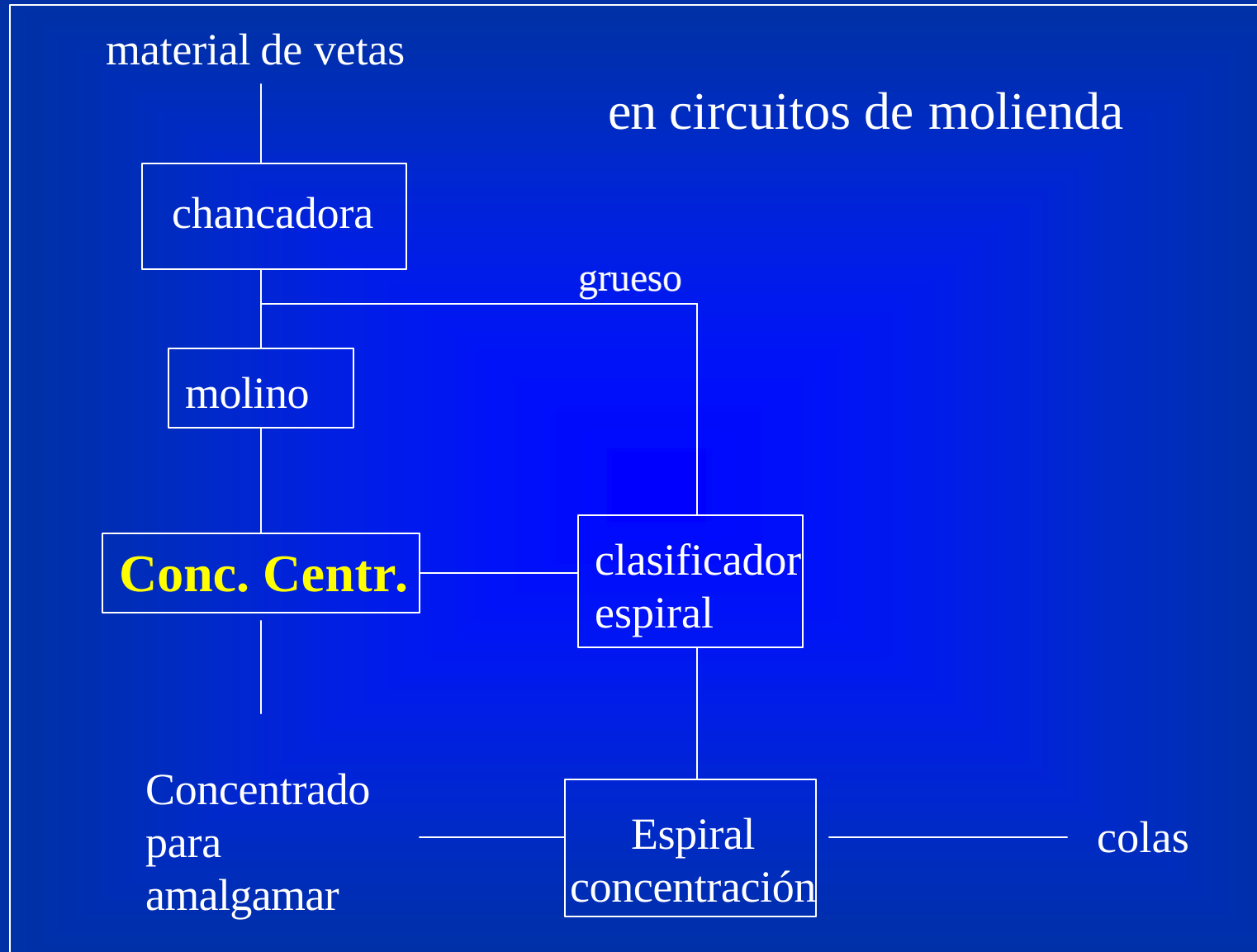
## Ventajas:

- alta capacidad
- buena recuperación de oro (en ciertas condiciones, por ejemplo oro finissimo  $<30\mu\text{m}$ , mejor que todo otro equipo)
- muy alto grado de enriquecimiento
- apto para limpiar colas de amalgamación
- alta seguridad contra robo

## Desventajas:

- alta demanda de agua limpia y de presión constante (para los equipos con agua contracorriente)
- posibilidad mínima de recuperar sulfuros
- operación difícil
- requiere motor eléctrico
- difícil de fabricar localmente en buena calidad
- costo alto debido a la importación necesaria, problemas con repuestos

# Ejemplo para el uso de concentradores centrífugos (1)



## Ejemplo para el uso de concentradores centrífugos (2)



# Amalgamación de concentrados

**El mercurio en la minería en pequeña escala debe ser usado solamente para la amalgamación de concentrados !**

## **objetivo:**

- recuperación alta
- baja producción de harina de mercurio
- colas de amalgamación con baja ley de mercurio y oro

## **realizar por:**

- uso de equipos adecuados (tambores, conos, mezcladoras, etc.)
- optimizar tiempo de la amalgamación
- pre-lavado de los concentrados antes de la amalgamación
- utilizar reactivos aptos para mejorar la amalgamación
- control y seguimiento del proceso

## Alternativas para la amalgamación de concentrados

- a) fundición directa
- b) lixiviación con cianuro
- c) lixiviación con chloro o bromo
- d) proceso oro/aceite

Todos los procesos alternativos no se han difundidos en la minería a pequeña escala por varios razones:

- su complejidad técnica (c, d)
- su alto costo (c, d)
- sus necesidad de un concentrado muy enriquecido (a, d)
- su tiempo largo necesario (b)

también tienen problemas ambientales (b, c, d)

## **Equipos para la amalgamación de concentrados**

- tambores
- conos
- mezcladoras de hormigon
- taladros con eje mezcladora

# Métodos para recuperar el mercurio de la amalgama

- retortas
- filtros
- ácido nítrico seguido por cementación del mercurio

# Retortas

## Ventajas:

- buena recuperacion de mercurio en forma liquida
- equipo liviano y móvil
- fácil manejo
- apto para producción local
- sirve para limpiar mercurio viejo
- precio bajo (de producción local)

## Desventajas:

- el oro/la amalgama no es visible en el proceso (con exepción a retortas de vidrio, que se quebran fácilmente)
- necessita más tiempo y combustible que la quema en aire libre
- el oro sale a veces sucio y/o parcialmente fundido
- no siempre existen fuentes de calor adecuadas
- existe el peligro de intoxicaciones por retortas no bien cerradas
- no sirve bien para pequeñas candidades de amalgama, se necessita varias retortas de diferentes tamaños

# Filtros

Filtros sirven para la quema de la amalgama con soplete en un horno, donde se ve la amalgama y los gases son succionados por un exhaustor en un tubo de enfriamiento y condensación

## Ventajas:

- amalgama y oro visible durante el proceso
- oro sale limpio
- tiempo de quema corto
- mercurio recuperado en forma liquida
- no importa la cantidad de amalgama

## Desventajas:

- equipo grande y estacionario
- necesita motor eléctrico o de gasolina
- recuperación de mercurio más bajo que en la retorta
- costo relativamente alto

# **Posibilidades para minimizar el uso y la emisión de mercurio**

(resumen)

1. Mejorar el manejo general de mercurio (transporte, almacenamiento, etc.)
2. Eliminar totalmente el uso de mercurio en circuitos abiertos
3. Optimizar el proceso de la amalgamación de concentrados
3. Recuperar el mercurio de la amalgama
4. Limpiar las colas de la amalgamación y depositarlas adecuadamente

# Flotación

## Ventajas:

- buena recuperación de oro fino y de sulfuros
- posibilidad de producir varios concentrados

## Desventajas:

- requiere molienda muy fina
- reactivos parcialmente dañosos al medio ambiente
- alto costo para reactivos
- requerimiento de energía relativamente alto
- requiere personal experimentado
- reactivos difícil de conseguir en países no mineros
- reciclaje de aguas difícil
- venta de los concentrados a empresas grandes

## Lixiviación por cianuro (cianuración)

**Una alternativa viable al uso de mercurio en la minería primaria en pequeña escala es la lixiviación por cianuro**

- no es útil usar la cianuración como proceso complementario, sino como proceso alternativo a la amalgamación !
- la cianuración puede tener efectos altamente dañinos al medio ambiente y a la salud de los trabajadores

La cianuración está en un proceso de auto-diseminación en muchas regiones de minería en pequeña escala, información y orientación/capacitación de los mineros es muy importante !

# Lixiviación por cianuro

Para minería en pequeña escala se usa dos formas de lixiviación por cianuro:

- percolación (material grueso „arena“)
- agitación (material fino)

## **Ventajas:**

- muy buena recuperación de oro y plata (no siempre!)
- uso para colas de concentración gravimétrica
- relativamente fácil manejo (en su forma rústica)

## **Desventajas:**

- sulfuros se quedan en las colas del proceso o son parcialmente lixiviados
- emisiones de cianuro, sus compuestos y metales pesados
- reactivo sumamente tóxico
- costos para reactivos altos, más altos todavía si se neutraliza el cianuro en las aguas residuales

Lixiviación con cianuro en forma rústica es muy fácil de hacer!  
pero:  
Sus daños al medio ambiente son enormes, sus riesgos son altos!

Lixiviación con cianuro bien operado en respecto al control del proceso y para evitar impactos ambientales, es un proceso complicado que requiere personal muy bien entrenado y experimentado !

## Manejo de aguas y residuos (colas, relaves)

Es necesario de recuperar los sólidos de las colas de plantas de procesamiento para

- evitar la contaminación de rios y des paisaje
- evitar problemas con los vecinos (agricultores, pescadores)
- guardar el material para re-procesarlo en futuro
- vender las colas a empresas de lixiviación (minería primaria)
- clarificar y reciclar el agua del proceso
- cumplir con los reglamentos legales

Residuos que requieren un depósito bien cerrado son:

- colas de amalgamación (por su contenido de mercurio)
- colas con sulfuros (para evitar la producción futura de aguas ácidas y emisiones de metales pesados). Es recomendable separar los sulfuros de las arenas y depositarlas en un depósito a parte

Los depósitos para esta clase de residuos necesitan un base impermeable, con cobertura contra agua de lluvia, en caso de sulfuros mezclado con cal para neutralizar la formación de ácidos)

## Métodos para recuperar sólidos de las colas

- pozos o piscinas de sedimentación (en serie)
- diques de colas tradicionales („upstream raised“)
- depositos secos para arenas con separación previa del agua  
utilizando clasificadores hidráulicos (de espiral o hidrococlón)  
o utilizando espesadores (preferibles: de lamella)

# Métodos para clarificar aguas del proceso

La clarificación del agua es necesaria para

- reciclar el agua al proceso (donde se requiere agua limpia)
- echar el agua, p.ej. a un río

Posibilidades para clarificar aguas

- con diques de colas tradicionales o piscinas de decantación suficientemente grandes y/o en serie
- con espesadores, preferiblemente tipo lamella, y uso de flocculantes

## Dirección del autor:

Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba  
Departamento de Procesamiento de Minerales  
RWTH Universidad de Aachen  
Lochnerstrasse 4-20  
52064 Aachen  
Alemania

e-mail: [wotruba@amr.rwth-aachen.de](mailto:wotruba@amr.rwth-aachen.de)