

Lixiviación de oro en tanque agitado y en bateas: desafíos operacionales del carbón activado y caracterización metalúrgica para la captura sistemática de finos — la propuesta de Goldplat PLC

Filipe Araujo^{1,*} · Yamir Velazco²

¹ Regional Manager LATAM — Goldplat PLC. Daveyton Road, New Modder, Benoni 1500, Sudáfrica.

² Innovation & Commercial Prospecting Specialist — Goldplat PLC / Gold Recovery Perú S.A.C.

* Correspondencia: faraujo@goldplat.com ; yvelazco@goldplat.com

Resumen. La lixiviación de oro con cianuro alcalino en tanques agitados (CIP, CIL) y sobre bateas o columnas (CIC, ADR) presenta tres desafíos operacionales que limitan el cierre del balance metalúrgico: la degradación física del carbón activado —con una pérdida *benchmark* de 64 g de carbón por tonelada de mineral, 40 % atribuible a la regeneración térmica—; la descarga no cuantificada de *streams* líquidos secundarios; y el escape de partículas finas de oro desde electrowinning. Basado en más de tres décadas de experiencia industrial de Goldplat PLC en Sudáfrica y Ghana, este trabajo integra los desafíos anteriores con la caracterización metalúrgica requerida y presenta el circuito de elución y captura de finos publicado por la empresa —sustentado en el cierre total de *loops* hidráulicos y materializado en siete elementos de diseño identificables—. Se propone una hoja de ruta de implementación en plantas existentes, con contribución esperable de 0,3 % a 1,5 % adicional al oro recuperado.

Palabras clave: lixiviación de oro; tanque agitado; bateas; carbón activado; finos; caracterización metalúrgica; CIP/CIL/CIC/ADR; balance metalúrgico; AMIRA P754; Goldplat.

1. Introducción

La cianuración alcalina seguida de adsorción sobre carbón activado (CA) granular constituye desde hace más de cuatro décadas la ruta hidrometalúrgica dominante para la recuperación de oro a escala global. Se ejecuta industrialmente en dos configuraciones principales: en tanques agitados —procesos CIP (*carbon in pulp*) y CIL (*carbon in leach*)— para mineral molido; y sobre bateas, columnas o pilas —procesos CIC (*carbon in columns*) y ADR (*adsorption-desorption-reactivation*)— para material de menor granulometría o *heap leaching*. La producción aurífera peruana totalizó 107,97 t métricas finas en 2024, con crecimiento interanual de 6,9 % y concentración regional en La Libertad (32,7 %), Arequipa (20,4 %) y Cajamarca (18,6 %) según el Boletín Estadístico Minero del MINEM (MINEM, 2025).

A pesar de su madurez tecnológica, los circuitos CIP/CIL/CIC/ADR presentan sistemáticamente brechas de oro no contabilizado del orden de 2 % a 12 % del oro alimentado. El presente trabajo (i) identifica los tres desafíos operacionales que explican la mayor parte de esta brecha, (ii) presenta el protocolo de caracterización metalúrgica de subproductos aplicado por Goldplat PLC, (iii) describe el circuito de elución y captura de finos publicado abiertamente por la empresa, y (iv) propone una hoja de ruta de implementación para plantas existentes.

2. Los tres desafíos operacionales del carbón activado en circuitos CIP/CIL/CIC/ADR

2.1. Degradación física del carbón activado

El carbón activado granular —típicamente de cáscara de coco, en granulometría 6×12 mesh— se degrada físicamente durante la operación. La degradación tiene tres focos: la atrición mecánica en tanques agitados por colisiones partícula-partícula y partícula-impulsor; la atrición en bombas centrífugas de transferencia entre etapas, particularmente agresivas con velocidades periféricas mayores que 15 m/s; y la atrición y oxidación térmica en la regeneración, donde los hornos rotatorios operando a 650–750 °C combinan acción de volteo mecánico con choque térmico. Kale (2019), en el AusIMM World Gold Conference, cuantifica una pérdida *benchmark* de 64 g de carbón por tonelada de mineral procesado, de los cuales aproximadamente el 40 % se atribuye a la etapa de regeneración térmica.

Los finos generados —partículas menores que 0,85 mm— contienen oro adsorbido pero son demasiado pequeños para ser retenidos por las pantallas inter-etapa y la malla de descarga del horno. Lin, Oleson, Hollow y Walsh (2002) reportan que estos finos consisten típicamente en 20–30 % de carbón, 70–80 % de *grit* y contienen entre 0,17 y 0,68 kg de oro por tonelada de finos, de los cuales el 80 % se presenta como oro libre recristalizado y el 20 % restante como oro adsorbido residual sobre matriz carbonosa.

2.2. *Streams líquidos secundarios no cuantificados*

Un circuito de elución y regeneración produce numerosos streams líquidos secundarios que, en plantas convencionales, son descargados directamente al espesador de cola o al *tailings dam* sin captura ni medición: aguas de transporte hidráulico, aguas de *quench* post-regeneración, efluente de *acid wash* y *rinse*, *spillage* operacional y rebases. En conjunto pueden representar 5–15 m³/h en una operación mediana, con sólidos suspendidos de 0,2–1,0 g/L y leyes de oro de 200–500 g/t en los sólidos.

2.3. *Escape de oro desde la celda de electrowinning*

Durante el lavado o cambio de electrodo, partículas finas de oro recristalizado se desprenden mecánicamente y son arrastradas por la solución estéril (*barren solution*) hacia el *make-up tank*. En plantas sin captura específica, este escape se ubica entre el 0,5 % y el 2 % del oro alimentado a la celda; con captura mediante lecho de carbón activado, el escape baja al rango 0,1–0,3 %.

3. Caracterización metalúrgica de subproductos para establecer desempeño

La caracterización rigurosa de subproductos auríferos es condición necesaria para seleccionar la tecnología de recuperación adecuada. La partición entre oro libre recristalizado y oro adsorbido sobre matriz carbonosa varía significativamente entre categorías: finos de regeneración térmica presentan oro libre dominante (favorable a flotación y gravimetría), mientras que finos de atrición mecánica presentan oro adsorbido dominante (favorable a transferencia a carbón virgen o RIL con resinas).

El protocolo aplicado por Goldplat integra cuatro niveles: (i) **físico-textural** —BET (ISO 9277), número de yodo (ASTM D4607, mínimo 1.000–1.050 mg I₂/g), dureza *ball-pain* (ASTM D3802, mínimo 97 %), densidad aparente (ASTM D2854)—; (ii) **químico** —*fire assay* por fracción granulométrica, ICP-OES/ICP-MS para impurezas relevantes (Cu, Ag, Ni, As, Sb, Hg, Fe, Zn), LECO para carbono total—; (iii) **mineralógico** —XRD, QEMSCAN o MLA para *deportment* del oro—; y (iv) **comportamiento metalúrgico** —*Diagnostic Leach Test* de cinco pasos, *Preg-Robbing Test*, ensayos R/K de cinética isoterma—.

Tabla 1. Categorías principales de subproductos auríferos y ruta de recuperación indicada según caracterización.

Categoría	Origen físico	Ley Au (g/t)	Ruta óptima
Finos de circuito	Atrición mecánica tanques y bombas	100 – 500	Transferencia a CA virgen
Finos de regeneración	Choque térmico en kilns	200 – 700	Flotación 3+2 etapas
Woodchips	Fragmentos madera/plásticos	50 – 2 000	Tamizado + incineración
Escorias	Fundición doré	100 – 5 000	Smelting con flux
CA fuera de especificación	CA gastado / envenenado	200 – 800	Reactivación o disposición

Fuente: elaboración propia basada en experiencia operacional Goldplat PLC en Sudáfrica y Ghana. Rangos de ley referenciales.

4. La solución Goldplat: cierre total de loops hidráulicos

Goldplat PLC opera desde hace más de tres décadas dos plantas dedicadas exclusivamente a la recuperación de oro a partir de subproductos: Goldplat Recovery en Benoni (Sudáfrica) y Gold Recovery Ghana en Tema. Ambas procesan anualmente finos de carbón, *woodchips*, escorias, residuos de fundición y cátodos gastados de operaciones mineras de todo África, devolviendo el oro recuperado como doré certificado. El circuito de elución y captura de finos publicado abiertamente por la empresa se sustenta en un principio operacional simple: *ningún stream líquido del circuito de elución y regeneración debe abandonar el sistema sin haber sido previamente filtrado a través de un filter press dedicado.*

4.1. Siete elementos de diseño del circuito

(1) Dos *filter presses* paralelos con segregación ácido-alkalino — streams alcalinos con placas PP, ácidos con PVDF, evitando precipitación de carbonatos y oxihidróxidos. (2) **Carbon fines holding tanks** dedicados aguas arriba de cada *filter press*. (3) **Captura formal del spillage** mediante *floor sumps* interconectados en áreas críticas (columnas, *regen kiln*, *electrowinning*, *filter presses*). (4) **Sieve bend** con *bulk bag* para separación de *woodchips* antes de la columna ácida. (5) **Quench tank** con *dewatering screen* post-regeneración, con arrastre mecánico de finos térmicos. (6) **Lecho de carbón activado en el make-up tank**, reduciendo el escape de oro del EW del rango 0,5–2 % al rango 0,1–0,3 %. (7) **Filtro de recuperación de eluted carbon** que cierra el loop, garantizando que ningún stream líquido salga del sistema sin haber pasado por al menos un mecanismo de captura física.

5. Hoja de ruta de implementación en plantas existentes

La adopción del enfoque en una planta convencional no requiere reconstrucción, sino la incorporación de un set de equipos adicionales y la reconfiguración hidráulica de los streams secundarios existentes. La Tabla 2 resume la hoja de ruta en tres niveles de inversión y cuatro fases temporales, alineada con los diez principios del código AMIRA P754 de contabilidad metalúrgica (AMIRA International, 2007).

Tabla 2. Hoja de ruta de implementación por niveles de CAPEX.

Nivel	CAPEX (USD)	Acciones principales	Retorno típico
1 — Diagnóstico	< 20 000	Muestreo extendido; cálculo de KPIs base	—
2 — Quick wins	< 100 000	Floor sumps; sieve bend; quench tank; dashboard KPIs	6 – 12 meses
3 — Central	100 000 – 500 000	Filter presses paralelos; holding tanks; carbon bed	18 – 36 meses
4 — Avanzado	> 500 000	Reemplazo de bombas; horno vertical (Minfurn u equivalente)	3 – 7 años

Fuente: elaboración propia basada en experiencia operacional Goldplat PLC. Rangos referenciales; cada caso requiere calibración específica.

La contribución incremental esperable al cierre del balance metalúrgico se estima entre 0,3 % y 1,5 % adicional sobre el oro alimentado, con *payback* típico entre 12 y 24 meses para operaciones medianas tras las fases 1 a 3. Goldplat puede acompañar a la operación mediante (i) asesoría técnica y protocolos de caracterización, (ii) diseño de ingeniería de detalle, o (iii) procesamiento externo de los subproductos capturados en sus plantas de Sudáfrica y Ghana con devolución del oro como doré certificado, sin CAPEX adicional para el titular.

5.1. Indicadores clave de desempeño para el seguimiento operacional

El seguimiento operacional de la implementación se articula sobre un conjunto reducido de KPIs cuantificables, alineados con el código AMIRA P754. La Tabla 3 presenta los principales indicadores con sus umbrales operativos verde/amarillo/rojo, que disparan acciones específicas cuando se exceden. La implementación exitosa se evalúa mediante hitos temporales: a 3 meses de la fase de *quick wins*, el KPI de *spillage* capturado debe pasar de cero a más de 0,3 g/t; a 6 meses tras la implementación central, el oro no contabilizado debe descender a menos de 4 %; y a 12 meses, la totalidad de los KPIs debe estar consistentemente en zona verde.

Tabla 3. Indicadores clave de desempeño (KPIs) del balance extendido y umbrales operativos.

KPI	Verde	Amarillo	Rojo (acción)
Tasa de generación de finos	< 60 g/t	60 – 80 g/t	> 80 g/t: revisar equipos
Ley de Au en finos	< 200 g/t	200 – 500 g/t	> 500 g/t: captura inmediata
Retención de pantalla	> 97 %	92 – 97 %	< 92 %: cambio/limpieza
Au no contabilizado	< 2 %	2 – 5 %	> 5 %: auditoría AMIRA
Spillage capturado	> 0,5 g/t	0,2 – 0,5 g/t	< 0,2 g/t: implementar
Escape de Au del EW	< 0,3 %	0,3 – 1 %	> 1 %: instalar carbon bed

Fuente: elaboración propia basada en experiencia operacional Goldplat PLC alineada con AMIRA International (2007). Umbrales referenciales; requieren calibración por operación.

6. Conclusiones

La lixiviación de oro en tanque agitado y en bateas presenta tres desafíos operacionales identificables —degradación física del carbón, *streams* líquidos secundarios no cuantificados y escape de oro del electrowinning— que explican brechas del balance metalúrgico del orden de 2 % a 12 % en plantas convencionales. La caracterización metalúrgica rigurosa es condición previa para seleccionar la tecnología de recuperación adecuada. El circuito de elución y captura de finos publicado abiertamente por Goldplat PLC materializa el principio del cierre total de *loops* hidráulicos en siete elementos de diseño específicos, aplicables a plantas existentes mediante una hoja de ruta escalonada en tres niveles de CAPEX. El impacto esperable es una recuperación incremental entre 0,3 % y 1,5 % del oro alimentado, con retorno típico entre 12 y 24 meses. La aplicación del enfoque al parque aurífero peruano —que produjo 107,97 t métricas finas en 2024— constituye una oportunidad concreta de mejora del desempeño metalúrgico en circuitos CIP, CIL, CIC y ADR.

Referencias

AMIRA International. (2007). *P754: Metal accounting code of practice* (Release 3). AMIRA International.
 ASTM International. (2018). *ASTM D4607-94(2021): Standard test method for determination of iodine number of activated carbon*. ASTM International.

- ASTM International. (2017). *ASTM D3802-16(2021): Standard test method for ball-pan hardness of activated carbon*. ASTM International.
- Kale, A. (2019). Study on attrition of carbon particles during regeneration of activated carbon. In *AusIMM World Gold 2019 conference proceedings*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Lin, H. K., Oleson, J. L., Hollow, J. T., & Walsh, D. E. (2002). Characterization and flotation of gold in carbon fines at the Fort Knox mine, Alaska. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 19(1), 21–24. <https://doi.org/10.1007/BF03402896>
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2^a ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2025). *Boletín estadístico minero — Diciembre 2024*. Dirección General de Minería.