Módulo 6 – Tema 3 –
Beneficios de integrar el manejo del agua con el control de calidad y reducción de riesgos ambientales.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RIESGOS

Tabla 1.1. Tipos de Riesgo Asociados al Manejo del Agua en

Tipo de Riesgo	Origen Hídrico	Impacto Principal	Indicadores Críticos	Consecuencia Potencial
Riesgo Físico (Catastrófico)	Agua libre, infiltración, presión de poros	Inestabilidad geotécnica	Nivel freático, piezometría, pendiente de beach	Fallas de presa, licuefacción, deslizamientos
Riesgo Geoquímico (Crónico)	Interacción agua-mineral reactivo	Drenaje ácido de roca (DAR)	pH, metales disueltos, sulfatos	Contaminación de acuíferos/superficies
Riesgo Hidrológico	Tormentas, ENSO, rebalse	Sobrecarga hidráulica	Capacidad de revancha, caudales de retorno	Desbordes, erosión, falla hidráulica
Riesgo Operacional	Calidad del agua de retorno	Ineficiencia de plantas	Turbidez, granulometría, sólidos totales	Mayor costo en mantenimiento; menor recirculación

Tabla 1.2. Mitigación de Riesgos Físicos (Estabilidad Geotécnica) y Control de Calidad (QC)

Dimensión del Riesgo	Mecanismo de Falla Evitado	Control Integrado del Agua	Métricas y Beneficios Clave
Riesgo Físico Catastrófico (Falla de la presa)	Licuefacción (pérdida de resistencia al cizallamiento)	**Deshidratación Avanzada**. Reducir el contenido de agua de los relaves aumenta su estabilidad física.	La eliminación del agua libre y de la superficie de la laguna reduce el potencial de flujo de lodo. Los relaves filtrados eliminan virtualmente el riesgo potencial de fallas por deslizamiento si se compactan.
Inestabilidad por Exceso de Agua	Desbordamiento (*Overtopping*) o Rebose.	**Control estricto de la revancha** (*freeboard*) y la laguna de aguas claras. Manejo eficiente de las aguas superficiales.	La gestión de la cantidad de agua es el control primario de seguridad. Un diseño inadecuado de las obras de evacuación superficial puede causar el aumento del nivel de la laguna.
Falla por Filtración/Erosión Interna	*Piping* (Tubificación) o deslizamiento progresivo.	**Monitoreo Geotécnico Continuo** de la presión de poros, niveles freáticos y deformación del muro. Instalación de sistemas de drenaje internos robustos.	El monitoreo permite una gestión reactiva basada en la influencia directa de las condiciones hídricas sobre la estabilidad física. Los relaves filtrados prácticamente eliminan la contaminación del agua subterránea por filtración.
Pasivos de Cierre (Riesgo a largo plazo)	Falla después del cierre, monitoreo perpetuo.	Uso de **relaves filtrados o apilamiento en seco**.	El apilamiento en seco o relaves filtrados crean una forma geotécnicamente estable y de bajo riesgo, y facilitan la rehabilitación progresiva.

RelaveNet
A Community of Excellence

RIESGOS

Tabla 2. Reducción de Riesgos Ambientales (Contaminación Crónica) y Control de Calidad

Dimensión del Riesgo	Contaminante/Problema Principal	Estrategia Integrada (Manejo Integrado del Agua & Control de Calidad)	Mecanismos y Beneficios Clave
Drenaje Ácido de Roca (DAR)	Oxidación de sulfuros (principalmente pirita) y lixiviación de metales (Pb, Zn, As).	**Prevención Geoquímica:** **1. Disposición Sub-acuosa** (cobertura hídrica permanente). **2. Deshidratación Máxima** (Apilamiento Seco).	La inmersión permanente evita el contacto de los sulfuros con el oxígeno atmosférico, inactivando la reacción de oxidación. La oxidación de sulfuros en relaves filtrados puede crear altas concentraciones de lixiviado, por lo que requieren pruebas geoquímicas detalladas.
Contaminación de Efluentes	Aguas residuales contaminadas generadas por el proceso minero.	**Monitoreo Geoquímico Continuo y Tratamiento Pasivo**.	El monitoreo de la calidad del agua (pH, metales) evalúa el cumplimiento regulatorio y sirve como alerta temprana para la integridad de los controles hídricos. Los sistemas de tratamiento pasivo (humedales, biorreactores) aprovechan procesos naturales para limpiar el agua contaminada.
Generación de Polvo	Partículas en el aire que contienen metales pesados y compuestos tóxicos.	**Control de Humedad Superficial** o **Uso de Relaves Espesados/Filtrados**.	Los relaves espesados y filtrados/pila seca tienen un riesgo similar y/o bajo de generación de polvo en la etapa de operación y post-cierre en comparación con los relaves convencionales. La implementación de cubiertas (como el "rain coat" o geomembranas) elimina la posibilidad de generar polvo.

RelaveNet
A Community of Excellence

BENEFICIOS

Tabla 3.1. Beneficios Operacionales, Económicos y Estratégicos

Área de Beneficio	Impacto de la Integración (Manejo Integrado del Agua & Control de Calidad)	Mecanismos de Ahorro/Eficiencia	Beneficios Estratégicos y de Cumplimiento
Eficiencia y Resiliencia Hídrica	Reducción de la demanda de agua fresca (huella hídrica).	**Máximo Reciclaje y Reutilización del Agua:** Los sistemas de tratamiento avanzados permiten reciclar hasta el **90%** de las aguas residuales.	Asegura el abastecimiento sostenible, proporciona suministro de agua resiliente en regiones con escasez. Es costoso usar agua desalinizada; fortalecer recirculación.
Optimización de Costos (OPEX)	Reducción del costo de tratamiento de aguas residuales y gestión del agua.	El Manejo Integrado del Agua reduce costos de transporte, captación y potabilización. El uso de tecnologías (sensores IoT y automatización) reduce costos de agua entre un **20% y 30%**. Optimizar, evita derroche de reactivos y energía.	En la mina Orcopampa, la optimización hídrica generó ahorros proyectados de US$ 2,415,178 para el período 2018–2028.
Cumplimiento Normativo y Gobernanza	Alineación con estándares internacionales y gestión de riesgos.	**GISTM** (Estándar Global Gestión Relaves) exige integración hídrica en la **Base de Conocimientos Integrada** (Requisito 2.2) y el **Balance Hídrico** (Requisito 4.4).	La óptima gestión es fundamental para obtener y retener la **Licencia de Operación**. Fortalece el perfil al reducir el consumo de agua y el riesgo de falla catastrófica.
Nexo Agua-Energía	Optimización del uso de energía en el suministro y la disposición de relaves.	La reducción de los requisitos de agua disminuye el costo de transporte, que es el componente más grande de costo si se usa agua de mar y se bombea a gran altura.	Mejorar la reutilización del agua mediante tecnologías de deshidratación mejora el nexo agua-energía. Los relaves espesados son menos intensivos en energía que los relaves convencionales en ciertas condiciones.

Tabla 3.2. Beneficios Técnicos Operacionales de la Gestión Integrada

Mecanismo	Beneficio Técnico	Cómo se Logra	Resultado en TSF
Balance hídrico optimizado	Control sobre entradas/salidas	Modelos determinísticos y probabilísticos	Estabilidad operacional y predicción climática
Gestión de nivel freático	Reducción presión de poros	Piezometría e infraestructura de drenaje	Menor riesgo de licuación
Mejora de retorno de agua	Aumento eficiencia planta	Filtración, espesadores HDS, piping eficiente	Ahorro energético y menor demanda hídrica
Control de turbidez	Mejor desempeño hidráulico	Monitoreo continuo QA/QC	Reducción de desgaste y fallas operativas

Tabla 3.3. Beneficios Económicos de la Gestión Integrada

Variable Económica	Impacto Hídrico Asociado	Beneficio	Ejemplo Documentado
Menor consumo de agua fresca	Recirculación > 90%	Reducción OPEX	Chile norte (minas en zonas áridas)
Menos tratamiento post-cierre	Minimización DAR	Menores costos perpetuos	Plan Nacional Relaves (Chile)
Evitar sanciones ambientales	Control calidad efluentes	Evita multas y paralizaciones	Caso Estero Pupío - Pelambres
Extensión vida útil TSF	Menos volumen líquido	Reducción expansiones	Mantos Blancos – relaves filtrados

RelaveNet
A Community of Excellence

INTEGRACIÓN

Tabla 4. Integración (Diagrama de Flujo de Gestión)

Etapa del Ciclo PDCA (SGR)	Actividad de Integración (Manejo Integrado del Agua & Control de Calidad)	Impacto Directo en la Seguridad/Riesgo
Planificar	Desarrollo de la Base de Conocimientos Integrada: Caracterización de la hidrología/geoquímica y el balance hídrico.	Minimizar riesgos a las personas y al ambiente. Predicción de Drenaje Ácido de Roca /quimismo del drenaje.
Hacer (Implementación)	Aplicación del **Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia**. Implementación de tecnologías de deshidratación y sistemas de recirculación.	Asegurar que la operación y construcción sigan la intención del diseño y se gestionen los controles críticos.
Verificar	**Monitoreo Continuo y Evaluación del Desempeño** (Niveles freáticos, presiones intersticiales, calidad geoquímica de efluentes).	Verificación en tiempo real si se cumplen los objetivos de desempeño y gestión del riesgo. Los datos del monitoreo alimentan la toma de decisiones.
Actuar (Mejora Continua)	Revisión de la gestión para la mejora continua. Actualizar planes y tecnologías para perfeccionar el diseño y la operación.	Respuesta a problemas identificados por el monitoreo para prevenir fallas y reducir pasivos a largo plazo.

La implementación del Manejo Integrado del Agua se enmarca dentro de un Sistema de Gestión de Relaves (SGR) que sigue el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar.

RelaveNet
A Community of Excellence

INTEGRACIÓN - TECNOLOGÍAS

Tabla 5.1. Tecnologías de Monitoreo en Gestión Integrada (Manejo Integrado del Agua + Aseguramiento y Control de Calidad)

Tecnología	Variable Controlada	Tipo de Control	Aplicación en TSF
Piezómetros	Presión de poros	Seguridad geotécnica	Prevención de licuación
Sensores IoT	Caudal, nivel, turbidez	Control operativo	Ajuste en tiempo real
Estaciones meteorológicas	Evaporación, lluvia, viento	Hidrología operativa	Predicción de rebalses
Muestreos hidroquímicos	pH, metales, sulfatos	Calidad ambiental	Evaluación de DAR
Telemetría satelital	Movimiento del muro	Estabilidad estructural	Sistema de alerta temprana

Tabla 5.2. Tecnologías de Deshidratación Avanzada

Método de Relaves	Porcentaje de Sólidos (aprox.)	Tasa de Recuperación de Agua Potencial	Beneficio de Estabilidad Geotécnica
Convencional (Slurry)	20% – 50%	Bajo/Medio (por evaporación o filtración de laguna)	Alto riesgo de licuefacción y falla.
Espesado/Pasta (TT/PT)	60% – 85%	Alto (hasta 90% recirculado directamente del espesador).	Reducción de volumen de almacenamiento. Menor riesgo que el convencional.
Filtrado/Pila Seca (FT/DS)	>85% (humedad <20%)	Máxima (hasta 90%).	Máxima estabilidad física. Elimina el riesgo de falla catastrófica asociada a la laguna.

La implementación de tecnologías de deshidratación avanzada es el principal motor de la integración (Manejo Integrado del Agua & Control de Calidad), ya que reconcilia la estabilidad física (necesidad de sequedad) con la sostenibilidad operativa (recuperación de agua).

RelaveNet
A Community of Excellence

INTEGRACIÓN

Tabla 6.1 Relación Regulaciones–Prácticas Técnicas

Marco normativo	País/Entidad	Exigencia	Respuesta Técnica
DS-248 (Chile)	Chile	Diseño y operación segura	Balance hídrico + espesamiento
GISTM 2020	Internacional	Gestión basada en riesgo	Monitoreo continuo + auditorías
DS-90 Calidad de aguas	Chile	Limite descarga	Tratamiento + recirculación
PAMA / ANA	Perú	Control químico y monitoreo	Filtración + drenajes controlados

Tabla 6.2 Estrategias Finales para la Integración (Integración entre Manejo del Agua, Control de Calidad y Gestión del Riesgo)

Estrategia	Pilar Integrado	Resultado Esperado	Estrategia
Deshidratación avanzada (TT/FT)	Seguridad física + eficiencia hídrica	TSF estable, con mínima agua libre	Deshidratación avanzada (TT/FT)
Cobertura húmeda o seca	Control geoquímico	No generación DAR	Cobertura húmeda o seca
Modelos de predicción climática	Riesgo hidrológico	Operación resiliente frente a ENSO	Modelos de predicción climática
Transparencia y datos públicos	Licencia social para operar	Reducción conflictos socioambientales	Transparencia y datos públicos

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 6 – Tema 3 –
Beneficios de integrar el manejo del agua con el control de calidad y reducción de riesgos ambientales.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**