

Informe final

# Estudio de patrones de flujo líquido en lechos porosos en celda bidimensional

Zenón Montanares G.

Dante Garrido V.

Tutor: Dr. Jorge Menacho, De Re Metallica Ingeniería SpA.

Profesor: Andrés Soto Bubert

Taller de empresas 1

Sede Bellavista

08/ julio / 2024

## INDICE

Resumen ejecutivo .....	4
Introducción .....	5
1. Descripción del proyecto: .....	6
1.1 Objetivos: .....	6
1.2 Objetivo General: .....	6
1.3 Objetivo específico: .....	6
Marco teórico .....	7
Inteligencia artificial (IA) .....	10
1. Random Forest: .....	10
2. Bayesian network .....	11
3. Neuronal Network .....	12
Metodología de Trabajo .....	13
1. Primera experiencia .....	14
1.1. Técnicas o métodos utilizados .....	14
1.2. Preparación del Mineral .....	14
1.3. Acondicionamiento del Mineral .....	16
1.4. Montaje del Experimento .....	16
1.5. Estudio de Goteo .....	17
1.6. Ejecución de la Experiencia .....	17
1.7. RESULTADOS PRIMERA EXPERIENCIA .....	18
2. Segunda experiencia .....	18
2.1. Preparación del Mineral .....	18
2.2. Acondicionamiento del Mineral .....	19
2.3. Montaje del Experimento .....	20
2.4. Montaje del Experimento .....	23
2.5. Goteo .....	23
2.6. Ejecución de la Experiencia .....	23
2.7. RESULTADOS .....	24
Hydrus .....	25
Conclusiones .....	27
Referencias .....	28
Anexos .....	29



## Resumen ejecutivo

El presente informe detalla el progreso del estudio realizado por Zenón Montanares y Dante Garrido, junto a la empresa “De Re Metallica”, sus representantes Jorge Menacho y Yadranka Zivkovic. Según acuerdos realizados posterior a la primera reunión se realizarán en lo posible durante el primer semestre dos modalidades de enfoque uno práctico y teórico.

Para el desarrollo práctico experimental Jorge Menacho dispone del material e insumos a utilizar además una celda bidimensional a pequeña escala que se mencionan en el documento con las cuales se confeccionará una matriz de pruebas experimentales.

Para el desarrollo teórico, se realiza investigación a los flujos en lechos porosos y como afecta el tipo de material y su humedad de manera práctica experimental, adicional, un estudio bibliográfico respecto a temas que relacionan a las leyes de la fluidodinámica, su respectivo marco teórico, descripción de software a utilizar (Software Hydrus), y posibles Inteligencias Artificiales (IA), para análisis e interpretación de base de datos puntuales y aleatorios (Random Forest, Bayesiana network, Physics-informed neuronal network)

## Introducción

En la industria Minera, el escurrimiento de líquidos en lechos porosos es una operación esencial, y uno de los escenarios más relevantes donde se aplica es en el proceso de lixiviación de minerales, especialmente en la extracción de cobre. La pila de lixiviación, una estructura porosa donde se deposita el material a procesar, presenta particularidades que la hacen objeto de estudio prioritario en este contexto.

El propósito de este documento es profundizar en la comprensión de cómo ciertas características de la pila de lixiviación, como la granulometría del material, el contenido de humedad y la distribución de partículas, influyen en el comportamiento del flujo de líquido a través de ella. Estos factores son cruciales para determinar la eficiencia de la extracción de cobre, ya que afectan directamente la velocidad y la uniformidad con la que el líquido se mueve por el lecho poroso y la cantidad de mineral que puede disolverse y extraerse.

Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo ensayos experimentales específicos diseñados para estudiar cómo varían los patrones de flujo en función de las diferentes condiciones del medio. Se explorarán cambios en la granulometría del material, niveles y zonas puntuales de humedad y distribución de partículas, como impactan la velocidad y la uniformidad del flujo de líquido a través del lecho poroso. Además, se analizará cómo estas variaciones afectan la eficacia global del proceso de extracción de cobre.

Al comprender mejor estas relaciones, se espera proporcionar información valiosa que permita optimizar los procesos de lixiviación en la industria minera, mejorando así la eficiencia y la rentabilidad de la extracción de minerales, especialmente en lo que respecta al cobre.

## 1. Descripción del proyecto:

Se estudiarán los fundamentos Hidrodinámicos, la modelación hidrodinámica, succión matricial y conductividad Hidráulica de un fluido líquido en medio poroso no saturado. Con el fin de comparar el teórico con lo práctico a través de experiencias por realizar. Utilizando una celda bidimensional. Se utilizará el software Hydrus para comparar datos.

### 1.1 Objetivos:

#### 1.2 Objetivo General:

Mejorar los índices de recuperación del cobre producido por la lixiviación, mediante manejo de variables hidrodinámicas asociadas al riego.

#### 1.3 Objetivo específico:

- Estudiar de manera experimental el efecto de la segregación granulométrica y de humedad en el patrón de flujo líquido.
- La adquisición de datos se hará mediante información de condiciones de borde del problema, reproducirá el comportamiento experimental, es decir, el perfil de flujo líquido en un campo bidimensional. Con la misma data se buscará la misma respuesta empleando un modelo hidrodinámico formal. Se compararán resultados.
- Interpretar los resultados mediante teoría de escurrimiento de líquidos en medios porosos de saturación variable, donde el Dr. Menacho tiene vasta experiencia.

Se empleará el modelo Flux <sup>TM</sup> desarrollado por DRM y extensamente validado en la lixiviación en pilas industriales. Se desarrollarán correlaciones que den cuenta del efecto del arreglo de partículas en la respuesta hidrodinámica y metalúrgica, la interpretación se hará alternativamente, mediante modelo matemático y herramientas de IA.

- Proyectar los resultados a nivel industrial de lixiviación en pilas.

Los resultados serán proyectados a nivel industrial, empleando los simuladores disponibles, modelo matemático e IA y los aportes de la investigación experimental de este trabajo.

## Marco teórico

La modelación hidrodinámica se basa principalmente en los conceptos de succión matricial y conductividad hidráulica del fluido (solución de riego) en un medio poroso no saturado (mineral apilado).

La conductividad hidráulica ( $k$ ) es una medida de la resistencia viscosa al flujo de solución que atraviesa el medio poroso (pila). Esta resistencia se expresa por la ley de Darcy y es la razón entre la velocidad de flujo ( $q$ ) y el gradiente hidráulico del fluido en el medio poroso ( $\nabla h$ ).

El gradiente hidráulico es la variación espacial de la energía potencial del fluido, siendo el potencial matricial ( $h$ ) la principal componente. El potencial matricial cuantifica la energía de retención del agua por la matriz porosa, debido a fuerzas capilares Y/o de adsorción.

El potencial matricial o succión matricial de un medio poroso completamente saturado es cero y sus valores decrecen ( $< 0$ ) a medida que el medio poroso se seca. Como la energía de retención depende de la cantidad de agua presente, se puede definir una relación entre contenido líquido y potencial matricial, la cual se denomina curva de succión matricial o curva característica de Humedad (SWCC).

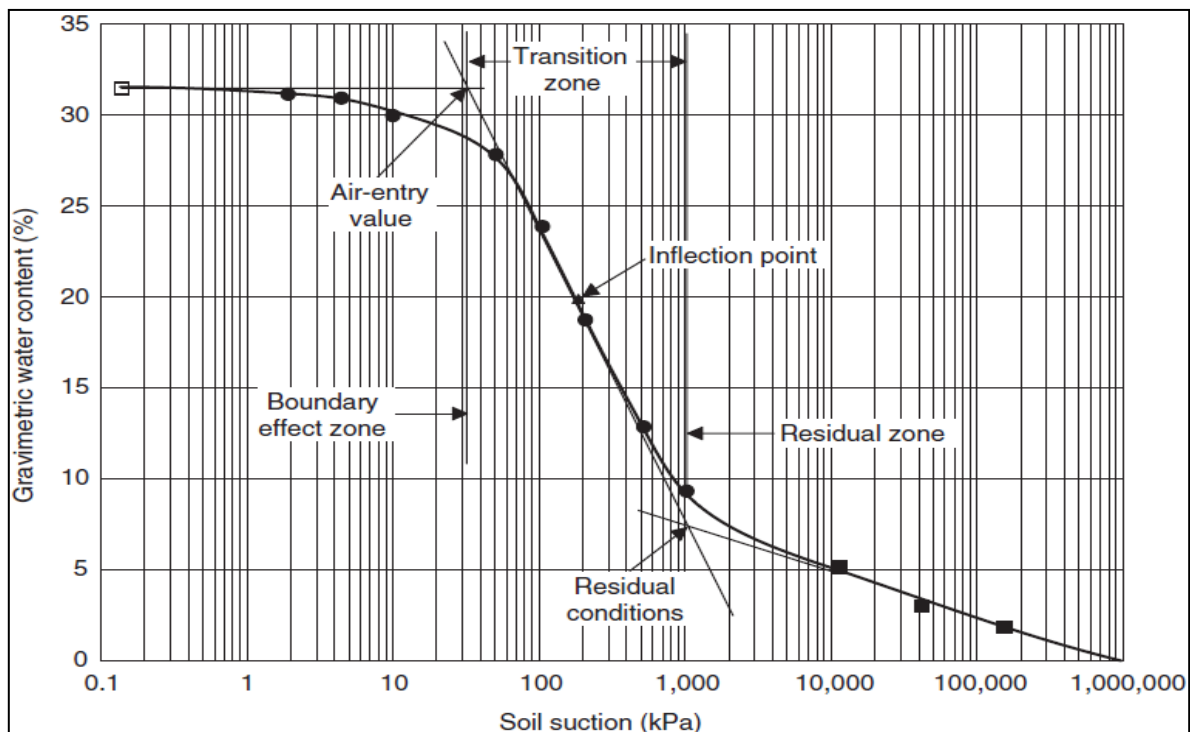


Figura 1. Curva característica de transporte líquido en un medio poroso de saturación variable.

### Modelamiento de la lixiviación en pilas

La modelación fenomenológica de la lixiviación se basa en fenómenos de transporte y cinética química o bioquímica de lixiviación. Se incorporan variables operacionales y de proceso, lo que permite modelar y simular el comportamiento de una pila en particular y de un conjunto de éstas.

Los principales fenómenos de transporte modelados son:

- Transporte de solutos, tales como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{O}_2$
- Transporte de aire
- Transporte de soluciones
- Transporte de bacterias
- Transporte de energía.

La cinética de lixiviación considera especies sulfuradas tales como Calcosina (Cc), Covelina (Cv), Calcopirita (Cpy), Bornita (Bor) y Pirita (Py) y también, óxidos como Brochantita (Br), Crisocola (Cr), Atacamita (At) y otras.

### Transporte de Soluciones

La modelación hidrodinámica se basa en la resolución de la ecuación de Richards, que corresponde al acoplamiento de las ecuaciones de continuidad (balance de masa) y movimiento del líquido (Darcy) en el medio poroso (pila o columna).

Balance Masa (Ec. Continuidad):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z}$$

Ecuación Momentum (Darcy):

$$q = -K \frac{\partial}{\partial z} (h + z)$$

Ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

$\theta$  = saturación (contenido líquido)

$k$  = conductividad hidráulica

$h$  = potencial matricial

$z$  = la coordenada de altura vertical

$t$  = tiempo



Para resolver la ecuación de Richards se debe conocer la relación  $(k / h / \theta)$ , siendo las condiciones de borde:

$$\theta(z, 0) = \theta_0 \quad y \quad k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)_{z=0} = q_0(0, t)$$

Como resultado, se obtiene el vector de caudal efluente y el volumen de inventario en el lecho poroso en función del tiempo. Las ecuaciones diferenciales se resuelven numéricamente en base diaria y por tipo de mineral.

La curva de succión matricial puede ser modelada matemáticamente a través del modelo de van Genuchten que describe el contenido de líquido ( $\theta$ ) en un medio poroso, en función de la succión o potencial matricial del líquido bajo condiciones no saturadas o en zona vadosa, descrita por la siguiente ecuación:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

donde:  $\theta_r$  y  $\theta_s$  son el contenido líquido residual en condiciones saturadas, respectivamente y  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  son parámetros del modelo.

El modelo de van Genuchten, también define una conductividad hidráulica relativa ( $k_r$ ) en función del contenido de líquido, permitiendo relacionar la conductividad hidráulica o permeabilidad del fluido en el medio poroso en función del contenido líquido y la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) mediante la siguiente relación:

$$k = K_s k_r(\theta)$$

## Inteligencia artificial (IA)

La automatización de procesos es una de las aplicaciones más destacadas de la inteligencia artificial en la industria minera. La combinación de algoritmos inteligentes y tecnologías avanzadas está transformando radicalmente la forma en que se realizan las operaciones en las minas, desde la extracción hasta el procesamiento de minerales.

En particular, examinaremos cómo los algoritmos de IA pueden analizar grandes conjuntos de datos geológicos y geofísicos para identificar ubicaciones prometedoras de depósitos minerales, cómo los sistemas autónomos pueden optimizar la planificación y programación de las operaciones mineras, y cómo la monitorización remota y la detección temprana de fallos pueden mejorar la seguridad en las minas.

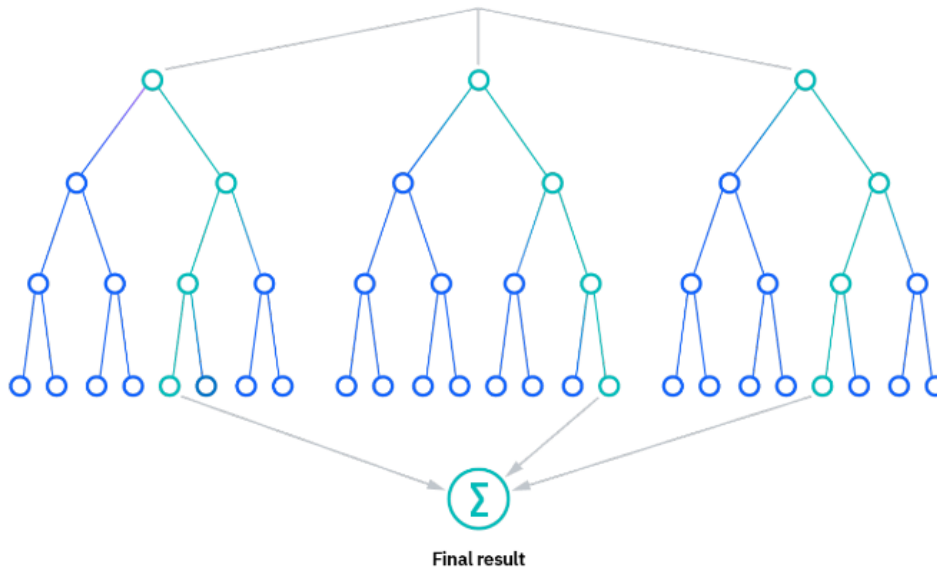
Puntualmente se conocerán tres tipos Random Forest, Bayesian Network y Neuronal Network.

### 1. Random Forest:

Es una inteligencia artificial que utiliza el aprendizaje automático de múltiples árboles de decisión para realizar predicciones más precisas y evitar el sobre ajuste, de manera de tomar la opinión utilizados por la mayoría y dar un resultado promediado, (Imagen 1).

Para su ejecución y desarrollo de Random Forest se debe:

- a. Construcción de árboles de decisión: Durante la practica, se debe crear una multitud de arboles de decisión o bosque de arboles de decisión. Cada árbol se construye de forma independiente utilizando un subconjunto aleatorio de datos de entrenamiento y características. Esto ayuda a reducir la correlación entre los árboles y a mejorar la diversidad del bosque.
- b. Proceso de decisión: Cuando se realiza una predicción con Random Forest, cada árbol en el bosque hace su propia predicción basada en las características del dato de entrada. En problemas de clasificación, cada árbol vota por la clase a la que pertenece el dato. En problemas de regresión, cada árbol hace una predicción numérica.
- c. Votación y promedio: Después de que todos los árboles en el bosque han hecho sus predicciones, se toma la clase más común (en problemas de clasificación) o la predicción media (en problemas de regresión) como la predicción final del bosque. Esto ayuda a reducir el efecto del ruido y el sesgo en las predicciones, ya que se basa en el consenso de múltiples árboles.



*Imagen 1: Interpretacion de Random Forest de manera visual*

## 2. Bayesian network:

En las redes bayesianas, se estudia un grupo de cosas o características que están relacionadas entre sí, pero que no siempre ocurren de la misma manera, se observa cómo afecta cada cambio y se usan gráficos para identificar conexiones. Si se tiene información de como suceden los eventos, se crean modelos que describen las relaciones de manera simple. Para hacer estas predicciones se utiliza como modelo probabilístico la ecuación de Bayes ya que uno de los principales objetivos de usar estas redes es predecir que podría pasar.

- a. Teorema de Bayes: describe cómo se actualizan las características sobre un evento dado nueva evidencia. Esto implica calcular la probabilidad de un evento dada la probabilidad de otro evento relacionado.

En resumen, es un modelo probabilístico para representar las relaciones entre variables aleatorias y actualizar los resultados sobre estas variables dado nuevas características.

$$P(A|B) = \frac{(P(B|A) * P(A))}{P(B)}$$

*Ecuación del Teorema de Bayes*

Se interpreta:

“P(A|B) es la probabilidad de que la hipótesis A sea verdadera dado que se ha observado el evento B”



" $P(B|A)$  es la probabilidad de que se observe el evento B dado que la hipótesis A sea verdadera".

" $P(A)$  es la probabilidad de que la hipótesis A sea verdadera"

" $P(B)$  es la probabilidad de que se observe el evento B"

Las redes bayesianas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluida la modelización de sistemas complejos en ciencias de la computación, la ingeniería, la medicina y la economía. Son especialmente útiles cuando se trata con incertidumbre y dependencias entre variables.

### 3. Neuronal Network

Una red neuronal enfocada o informada por física, o "Physics-informed neural network" (PINN), es un tipo de modelo de aprendizaje automático que incorpora principios físicos o leyes fundamentales en su arquitectura y proceso de entrenamiento. Este enfoque combina la capacidad de las redes neuronales para aproximar funciones complejas con el conocimiento de las leyes físicas que gobiernan un sistema.

Al combinar la flexibilidad de las redes neuronales con el conocimiento físico, las PINN pueden hacer predicciones más precisas y generalizadas en problemas físicos, especialmente en casos de datos limitados o ruidosos.

A diferencia de las redes neuronales estándar que pueden aprender patrones a partir de datos de entrenamiento, las PINN están diseñadas para incluir directamente este conocimiento en su estructura. Pueden integrar ecuaciones físicas conocidas como restricciones adicionales durante el proceso de optimización. Esto permite guiar el aprendizaje de la red hacia soluciones que no solo son coherentes con los datos, sino también con las leyes físicas subyacentes.

## Metodología de Trabajo

Como objetivo de este experimento es investigar los diferentes patrones de flujo líquido en lechos porosos.

Materiales requeridos:

Primera etapa:

- celda bidimensional (recipiente transparente con forma paralelepípedo). 30x10x25.
- Embudo decantador en forma de pera.
- Embudo.
- Pinzas de laboratorio.
- Doble nuez.
- Soporte universal.
- vaso de precipitado.
- Probeta.
- Paño rolator, Nylon (1.20x1.20).
- Cámara.
- Mineral industrial.
- Tamizadores.
- RO-TAP.
- Sistema de riego controlado.
- Flexómetro.

Se llevaron dos experiencias en la celda bidimensional, donde el mineral es previamente acondicionado, para luego depositarlo en la celda de diferentes maneras (tamaño granulométrico) y humedad, luego se procede a realizar el riego con caudal específico y visualizando el patrón del flujo líquido. Con la ayuda de la cámara se filmará todo el proceso para la obtención de datos.

Segunda etapa:

Se simula la misma experiencia con las variables (masa, volumen, densidad, humedad) mediante el software Hydrus 2D.

Con los fundamentos estudiados de la hidrodinámica se comparará la correlación que tiene lo teórico con lo práctico.

Finalmente, con los resultados de las dos experiencias se integrarán los análisis para hacer una proyección en procesos industrial para obtener conclusiones y recomendaciones para la industria.

## 1. Primera experiencia

### 1.1. Técnicas o métodos utilizados

Antes de realizar un análisis con material granulado es necesario mezclar de manera correcta la muestra a utilizar para esto se realiza el uso de dos métodos:

- Método de Roleo: Para esta mezcla se utiliza un paño roleador idealmente mismas medidas largo y ancho, dos personas que puedan sujetar los extremos y tirar de ellos de un extremo a otro para poder rotar la muestra.
- Método de cono y cuarteo: método que consiste en colocar la muestra sobre una superficie plana a la cual se le dará forma de torta y será dividida posteriormente en cuatro partes lo más simétrico posible, luego se eligen lados opuestos con los que se trabajarán.

Posterior a la realización de la mezcla se procederá a su respectiva carga de la celda bidimensional y goteo a flujo controlado, con filmación del movimiento del frente húmedo.

### 1.2. Preparación del Mineral

Para las muestras facilitadas por la empresa De Re Metallica, se aglomeró el material con variada granulometría con la técnica de roleo, el paño roleador, para este caso fue un cuadrado de nylon de 1.20m de largo y ancho, se roleo 6 veces con el fin de simular el movimiento del tambor aglomerado (Imagen N°1).



*Imagen N°1: Muestra utilizada sobre paño roleador sujetado de sus cuatro extremos*

Luego se utilizó el método de cono y cuarteo para preparar el mineral. Este método consiste en formar un cono con el mineral para posterior realizar una torta con el fin de dividir el total en dos primeras partes (Imagen N°2), y luego realizar otra división de estas otras partes para tener un total de cuatro partes simétricas (Imagen N°3).



*Imagen N°2: Primera división de la torta*



*Imagen N°3: División de partes ya divididas con el fin de obtener cuatro partes simétricas*

Se seleccionaron dos partes opuestas que serán condicionadas y las otras dos en este caso no se desecharon, si no que, se utilizó como muestra seca para posterior volver a mezclar con el método del roleo.

### 1.3. Acondicionamiento del Mineral

El mineral preparado se dividió en cuatro partes. Las dos partes contrarias se acondicionaron al 10% de humedad p/p (imagen N° 4), asegurando una distribución uniforme de la humedad. Posteriormente, las cuatro partes se mezclaron utilizando el método de roleo.



*Imagen N°4: Material acondicionado con 10% humedad*

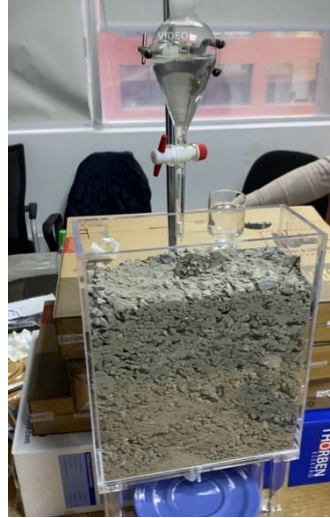
### 1.4. Montaje del Experimento

El mineral mezclado se depositó dentro de la celda bidimensional (Imagen N° 5). Se montó un embudo decantador de forma de pera, fijado a un soporte universal con el doble nuez y las pinzas, para que el agua goteara justo en el centro de la celda (Imagen N° 6).



*Imagen N°5: Proceso de depósito de mineral en celda bidimensional*





*Imagen N°6: Montaje del experimento*

### **1.5. Estudio de Goteo**

Se realizó un estudio de goteo para determinar el flujo de agua, registrando que en 141 segundos cayeron 40 cm<sup>3</sup> de agua en una probeta. Esto permitió calcular la tasa de riego necesaria para la experiencia, que fue de 41 L/h/m<sup>2</sup>.

### **1.6. Ejecución de la Experiencia**

Con la celda montada y el embudo en posición, se inició la experiencia dejando que el agua goteara durante 1 hora. Se observaron y registraron los cambios en el flujo a lo largo del tiempo (Imagen N°7).



*Imagen N°7: Registro del flujo y patrón de cambios en el tiempo*

### 1.7. RESULTADOS PRIMERA EXPERIENCIA

- **Preparación y Mezcla del Mineral:** El mineral se mezcló homogéneamente usando el método roleo y posterior el método de cono y cuarteo, asegurando una distribución uniforme de humedad en la mitad condicionada.
- **Estudio de Goteo:** El flujo de agua fue de aproximadamente 1.021 l/h.
- **Comportamiento del Flujo en la Celda:** Durante los 60 minutos de la experiencia, se observó cómo el agua se distribuía a través del mineral en la celda bidimensional, al principio de forma de abanico, formándose caminos preferenciales y acumulaciones en ciertas áreas, probablemente las de mayor contenido de finos.
- **OBSERVACION:** No se pudo establecer correspondencia entre posición de zonas húmedas y deformación del frente líquido, por lo que, en la siguiente experiencia, se prepararán lechos artificialmente distribuidos.

## 2. Segunda experiencia

Se utilizó las mismas Técnicas de la primera experiencia

Para eso es necesario mezclar de manera correcta la muestra a utilizar para esto se realiza el uso de dos métodos:

- Método de Roleo
- Método de cono y cuarteo
- Carga de la celda bidimensional y goteo a flujo controlado, con filmación del movimiento del frente húmedo.

En esta experiencia a la celda se le añade, adicional del mineral seco, 2 bloques de mineral húmedo, dando una forma personalizada con diferentes granulometrías.

### 2.1. Preparación del Mineral

Al igual que la experiencia anterior, se aglomeró el material con variada granulometría con la técnica de roleo para lo cual, se roleo 6 veces con el fin de simular el movimiento del tambor aglomerador (Imagen N°1).

Luego se utilizó el método de cono y cuarteo para preparar el mineral. Este método consiste en formar un cono con el mineral para posterior realizar una torta con el fin de dividir el total en dos primeras partes (Imagen N°2), y luego realizar otra división de estas otras partes para tener un total de cuatro partes simétricas (Imagen N°3).

Se seleccionaron dos partes opuestas que serán condicionadas y las otras dos en este caso no se desecharon, si no que, se utilizó como muestra seca para posterior volver a mezclar con el método del roleo.

## 2.2. Acondicionamiento del Mineral

Se pesó 1.845 kg de mineral con una bolsa y se humectó con 137 ml de agua (0.137 kg) mediante el método de roleo con prueba del guante. (masa bolsa = 0.038 kg). El volumen del mineral seco se calcula por su masa y densidad, Sabemos que su densidad es 1.45 t/m<sup>3</sup>, es decir, 1450 kg/m<sup>3</sup>.

- $Vol. mineral seco = \frac{masa mineral seco}{densidad} = \frac{1.845 kg}{1450 kg/m^3} = 0.001272 m^3 = 1.272 L$
- $Vol. total mineral húmedo = Vol. mineral seco + Vol. del agua = 1.272 L + 0.137 L = 1.409 L$
- $densidad mineral húmedo = \frac{masa mineral seco + masa agua}{volumen total} = \frac{1.845 kg + 0.137 kg}{1.409 L} = \frac{1.982 kg}{1.409 L} = 1.41 kg/L$
- $porcentaje de humedad = \frac{masa del agua}{masa mineral seco} \times 100 = \frac{0.137 kg}{1.845 kg} \times 100 = 7.43 \%$

El mineral húmedo se reserva para luego ser depositado en la celda.

### 2.3. Montaje del Experimento

Se añadió 1.700 ml en una probeta de mineral seco, la masa del mineral con la probeta es de 2.87 kg, donde la masa de la probeta 0,402 kg. La masa del mineral por ende es de 2.5 kg y esto nos da una densidad de 1.45 t/m<sup>3</sup>. Esta cantidad se depositó en la base de la celda nivelando. Además, se instaló cartones para dividir la celda (imagen N°8).



*Imagen N°8: Proceso de depósito de mineral en el primer nivel en la celda y posicionamiento de cartón separador*

Se pesó 0.778 kg de mineral húmedo con densidad de 1.41 t/m<sup>3</sup> (1410 kg/m<sup>3</sup>) y se depositó en el primer cuadrado humectado (imagen N°9).

$$- \text{Vol. mineral húmedo} = \frac{\text{masa mineral húmedo}}{\text{densidad}} = \frac{0.778 \text{ kg}}{1410 \text{ kg/m}^3} = 0.0005517 \text{ m}^3 = 0.552 \text{ L}$$



*Imagen N°9: Material depositado en el primer cubo, acondicionado aprox. con 7.43% de humedad*

Luego se relleno los bordes con 2 kg de mineral seco, con densidad de 1.45 t/m<sup>3</sup> (imagen N°10).

$$- \text{Vol. mineral seco} = \frac{\text{masa mineral seco}}{\text{densidad}} = \frac{2 \text{ kg}}{1450 \text{ kg/m}^3} = 0.00138 \text{ m}^3 = 1.38 \text{ L}$$



*Imagen N°10: Material seco depositado al borde del mineral humectado.*

Se retiró los cartones para depositar una capa de mineral seco de 0.5 kg que separa los cuadrados humectados, manteniendo la densidad de 1.45 t/m<sup>3</sup>. luego se instalan los cartones para formar el ultimo cubo (imagen N°11).

$$- \text{Vol. mineral seco} = \frac{\text{masa mineral seco}}{\text{densidad}} = \frac{0.5 \text{ kg}}{1450 \text{ kg/m}^3} = 0.000344 \text{ m}^3 = 0.34 \text{ L}$$



*Imagen N°11: Capa de Mineral seco e instalación de cartón divisor.*

Se pesó 0.748 kg de mineral húmedo con densidad de 1.41 t/m<sup>3</sup> (1410 kg/m<sup>3</sup>) y se depositó el segundo cuadrado humectado (imagen N°12).

$$- \text{Vol. mineral húmedo} = \frac{\text{masa mineral humedo}}{\text{densidad}} = \frac{0.748 \text{ kg}}{1410 \text{ kg/m}^3} = 0.000530 \text{ m}^3 = 0.53 \text{ L}$$



*Imagen N°12: Material depositado y acondicionado aprox. con 7.43% de humedad ubicado en el segundo cubo humectado.*

Luego se rellenó los bordes con 1.85 kg de mineral seco, con densidad de 1.45 t/m<sup>3</sup> y se retiró el cartón (imagen N°13).

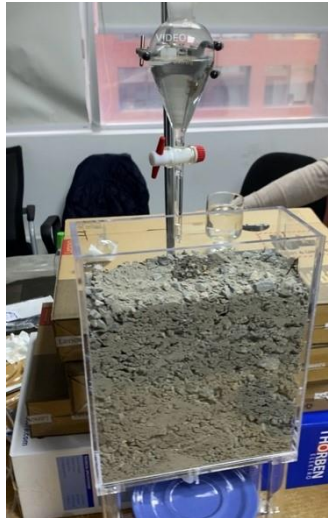
$$- \text{Vol. mineral seco} = \frac{\text{masa mineral seco}}{\text{densidad}} = \frac{1.85 \text{ kg}}{1450 \text{ kg/m}^3} = 0.00128 \text{ m}^3 = 1.28 \text{ L}$$



*Imagen N°13: Material seco depositado al borde del mineral humectado y nivelado.*

#### 2.4. Montaje del Experimento

El mineral se depositó dentro de la celda bidimensional (Imagen N°13). Se montó un embudo decantador de forma de pera, fijado con un soporte, para que el agua goteara justo en el centro de la celda (Imagen N°14).



*Imagen N°14: Montaje del experimento*

#### 2.5. Goteo

Se realizó con varios flujos de goteo

- Primer flujo con tasa de 5 l/h/m<sup>2</sup> desde 0 hasta los 22 minutos
- Segundo flujo con tasa de 10 l/h/m<sup>2</sup> desde 22 a los 40 minutos
- Tercer flujo con tasa de 15 l/h/m<sup>2</sup> desde 40 hasta los 57 minutos
- Cuarto flujo con tasa de riego de 23.6 l/h/m<sup>2</sup> desde los 57 hasta los 69

#### 2.6. Ejecución de la Experiencia

Con la celda montada y el embudo en posición, se inició la experiencia dejando que el agua goteara durante 69 min. Se observaron y registraron los cambios en el flujo a lo largo del tiempo (Imagen N°15 – 16 – 17 - 18).





*Imagen N°15-16-17-18: Registro del flujo y patrón de cambios en el tiempo. Se registraron las imágenes en cada cambio de flujo.*

## 2.7. RESULTADOS

- **Preparación y Mezcla del Mineral:** al realizar una humectación por separado de la muestra seca se puede mantener y ver claramente la diferencia de zonas húmedas
- **Estudio de Goteo:** según la realización del practico se fue aumentando el flujo de esta segunda experiencia debido a que el goteo que se utilizo inicialmente fue muy lento y se aumentando de manera controlada
- **Comportamiento del Flujo en la Celda:** se puede apreciar que el flujo al caer sobre el mineral comienza su expansión gradual en el centro de la celda en forma de abanico por el lado izquierdo del cubo húmedo que está situado arriba luego al encontrar el segundo cubo húmedo su expansión en abanico continuo con una leve curvatura debido a que acelero el recorrido
- **OBSERVACIONES:** al colocar los cartones o separadores entre el mineral seco y el húmedo queda una pequeña abertura o canal del grosor del separador por la cual puede afectar en el recorrido del flujo, y existe aglomeración de finos que se pueden apreciar en esta segunda experiencia



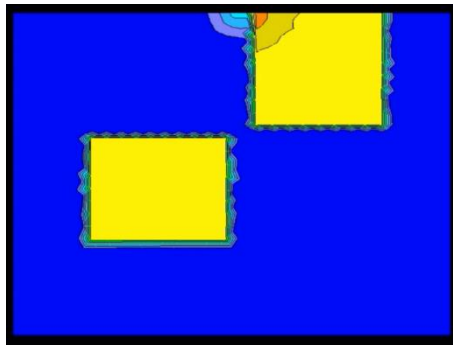
## Hydrus

Es un software de modelado que se puede utilizar para analizar el flujo de agua, el calor y el transporte de solutos en medios porosos saturados de forma variable. Esta basado por una interfaz interactiva que entrega gráficos para el procesamiento de datos. Se extiende en 2D/3D que tiene la capacidad de simulación a la segunda y tercera dimensión.

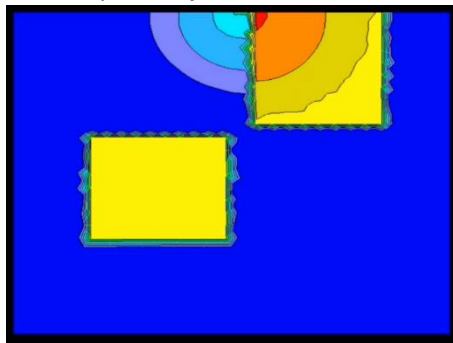
En la secuencia de imágenes que se muestra a continuación es la simulación que se realizó en el software HYDRUS el cual es una representación computarizada de la segunda experiencia

Secuencia:

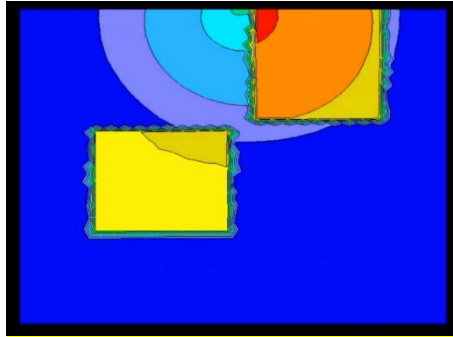
- a- En esta primera imagen se muestra como la distribución en abanico del cuadrante superior es más rápido debido a la humedad que este cuadrante representa.



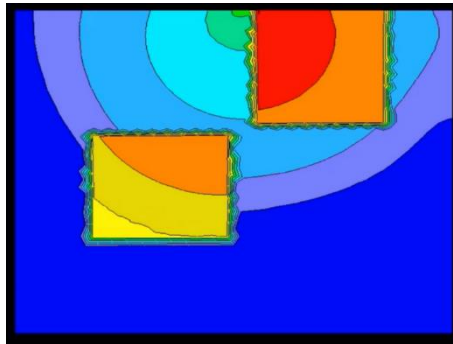
- b- En la segunda imagen se puede apreciar con más claridad rapidez con la que se distribuye el flujo.



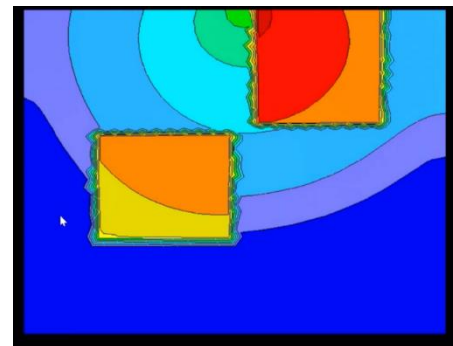
- c- En esta tercera imagen se puede apreciar como el flujo comienza a internalizar en el bloque húmedo de más abajo y manteniendo se distribución en abanico.



- d- La cuarta imagen muestra una leve diferencia en la distribución del flujo, si bien mantiene su forma de abanico tiene un leve aumento de distribución debido a la humedad del bloque situado en la zona inferior



- e- En la última imagen se observa la internalización completa del flujo en el bloque inferior y una distribución mas enfocada en el lado izquierdo de la celda bidimensional simulada



## Conclusiones

Basado en la revisión bibliográfica la recuperación de cobre no solo depende de la mayor o menor solubilidad química frente al lixiviante, sino, también de la eficiencia del riego aplicado. Esto último está poco caracterizado desde el punto de vista hidrodinámico y es de alto impacto frente a la problemática de definir relaciones entre altura de pila, tasa de riego y contenido de finos, así como rampas de humectación.

Los modelos matemáticos que se utilizan para caracterizar el mineral en las columnas de lixiviación nos permitirán obtener las variables del medio poroso y la conductividad hidráulica. Se irán determinando que modelo matemático será propuesto para este estudio.

En lo que a práctico y o experiencias realizadas refiere, de la primera experiencia se recalca, si bien en esta no se llevo un control adecuado, sirvió como guía para poder realizar una visión con otro enfoque en lo que respecta a distribución de humedad, es el porqué, de la segunda experiencia.

La segunda experiencia se realizo un registro de todo, por ello, podemos destacar la el flujo si bien durante el tiempo fue cambiando la distribución en abanico solo debía ser más rápida o más lenta, pero al colocar los bloques húmedos su escurrimiento por esas zonas se hacía más rápido.

Al realizar el diseñado de la segunda experiencia, es decir la humedad por zonas o en este caso por bloques, los separadores utilizados(cartones) su grosor deja una abertura o separación entre zonas húmedas y secas lo que influye en la distribución y no se aprecia en la simulación lo que lleva a ser un punto a tener en cuenta para las siguientes experiencias y simulaciones con HYDRUS. Se puede aprecia también una concentración de finos por toda la zona izquierda de la celda bidimensional lo que hace que el flujo por ese sector sea más fluido y fácil humedecer. Estos sucesos son apreciables en la secuencia de imágenes en el punto, 2.6. Ejecución de la experiencia. (Imagen N°15-16-17-18)

Para llevar un mejor control se debería llevar un flujo fijo, para poder apreciar de manera contante como es el escurrimiento y así solo enfocarse en la distribución por el lecho poroso, realizar otras experiencias o simulaciones con concentraciones de finos con otras distribuciones, o bien, sin concentraciones de finos, para de esta manera investigar y corroborar el resultado ya apreciado en la segunda experiencia con el fin de tener un punto a tener en cuenta para la base de datos que necesitara la inteligencia artificial.

## Referencias

- Darcy, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, Paris, France.
- Richards, L.A. (1931) "Capillary conduction of liquids through porous mediums" Physics, 1(5):318 – 333.
- M. T. van Genuchten, "Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Science Society of America Journal, vol. 44, no. 5, pp. 35–53, 1980.
- M.Th. van Genuchten (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. Journal, 41, pp. 278-285.
- IBM. ¿Qué es el random forest?.
- M.B. Rao, C.R. Rao.(2014). Handbook of statistics volume 32. Chapter 10- Bayesian Networks. ScienceDirect
- Juvenal Yosa PhD.(dic. 2023). PINN Physics-Informed Neural Network (Red Neuronal Informada por la Física). Linked in.
- M.F. Hernández-López, C. Ortiz, C.A. Bonilla, J. Gironás and J.F. Muñoz, "Modelling changes to the hydrodynamic characteristics of agglomerated copper tailings", Hydrometallurgy, Vol. 109, 2011, 175-180
- DÍAZ, R. A. (2015). *ANÁLISIS COMPUTACIONAL Y EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE SATURACIÓN EN COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN DE DISTINTOS DIÁMETROS [Tesis de grado magister, Universidad de Chile]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132807>

## Anexos

### Anexo 1. Celda bidimensional



### Anexo 2. Columna de lixiviación

### Anexo 3. RO-TAP (agitador)



#### Anexo 4. Tamizadores

