



Recuperación de agua en relaves mineros mediante el uso de drenaje electro osmótico

Recovery of water from mine tailings by electro-osmotic drainage

Camilo Valencia¹, alumno 5to año.
Andrés Collado¹, alumno 5to año.
Claudio Acuña¹, profesor asociado.

¹Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María.

*Autor para correspondencia: claudio.acunap@usm.cl.

Camilo Valencia¹, alumno 5to año.
Andrés Collado¹, alumno 5to año.
Claudio Acuña¹, associate professor.

¹Departament of Chemistry and Environmental Engineering,
Universidad Técnica Federico Santa María.

*Correspondence author: claudio.acunap@usm.cl.

RESUMEN

En el contexto de encontrar fuentes de agua alternativas de una manera económica y amigable ambientalmente en la industria minera, tanto metálica como no metálica, se propone la recuperación del agua retenida en los poros de los relaves mineros para su posterior uso en los procesos de extracción de minerales. Actualmente, no existe una tecnología que permita para retirar esta agua de manera eficiente. Es por esto que se construyó un sistema de drenaje electro osmótico, una tecnología innovadora, a escala de laboratorio para realizar pruebas recuperando agua en soluciones de arcilla. Tales pruebas permitieron recuperar agua con un consumo eléctrico de 36 kWh por metro cúbico, lo cual conlleva un costo monetario similar al bombeo de agua de mar hasta una mina, concluyéndose que esta tecnología puede producir una fuente de agua alternativa a precios razonables.

Palabras clave: recuperación de agua, drenaje electro osmótico, RETENCIÓN CAPILAR.

ABSTRACT

In the context of the mining industry's quest for alternative, cost-effective and environmentally friendly sources of water, we propose the recovery of water trapped in the pores of mine tailings for subsequent use in the mineral extraction process. Current technology does not allow for efficient removal of this water. To address this, we have conceived a technological innovation, an electro-osmotic drainage system that we have built at laboratory scale in order to test the recovery of water from clay solutions. Our tests showed that, at an electric consumption of 36 kWh per cubic meter, the cost of this process is similar to that of pumping seawater to a mine. We thus conclude that electro-osmotic drainage is capable of providing an alternative source of water at a reasonable cost.

Key words: water recovery, eletro-osmotic drainage, CAPILLARY RETENTION.

1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la minería metálica y no metálica es clave el uso eficiente del agua, especialmente en zonas desérticas como el norte del país, donde el suministro natural de agua es muy menor a lo demandado. Esta necesidad de uso eficiente incluye a los nuevos proyectos mineros que usan agua de mar, dado que, por concepto de transporte e impulsión al altiplano, el costo es de al menos 2 USD/m³, es este valor el que será usado para comparar los resultados experimentales de este trabajo.

Las principales pérdidas de agua en procesos mineros son las **PULPAS RESIDUALES**, también conocidas como relaves mineros. Estas pulpas son tratadas con tecnología de espesamiento de lodo hasta llegar a un 30% de **HUMEDAD** en el mejor de los casos y luego son desecharadas en **TRANQUES DE RELAVES**, a la vez desecharando toneladas de agua que se encuentran en estas pulpas. Los tanques de relaves también producen contaminación ambiental, ya que se filtra agua con minerales y desechos a través del suelo hasta las aguas de napas subterráneas.

Actualmente el agua desecharada junto con las pulpas residuales no puede ser recuperada, ya que esta está **RETIENIDA CAPILARMENTE**, esto significa que se encuentra atrapada dentro de los pequeños poros y microporos que tienen las partículas del sólido que conforman la pulpa, al estar atrapada de esta manera se requieren grandes cantidades de energía para recuperarlas de maneras convencionales como, por ejemplo, calentar la pulpa hasta que evapore o en casos muy extremos, aplicar

1. INTRODUCTION

The efficient use of water is key to the development of both metal and non-metal mining industries, particularly in desert zones, such as the north of Chile, where the demand for water far outstrips the natural supply. The need for the efficient use of water extends to new mining projects which rely on sea water, since the minimum cost of transporting this water and pumping it up to the height of the Andes High Plains (from the Spanish *altiplano*) is of 2 USD/m³. This value will represent the benchmark against which the results of this study will be measured.

During the mining process, most water is lost in the **RESIDUAL PULPS**, also known as mine tailings. These tailings are treated by sludge thickening until they reach a minimum **HUMIDITY** of 30%, after which they are disposed of into **TAILINGS PONDS**, together with the tons of water they still contain. Tailings ponds leach minerals and waste into soil and groundwater. Therefore, they represent an environmental hazard. At present, the water disposed with the residual pulps cannot be recovered and said to be **CAPILLARY-RETAINED**. This means that it is trapped within the micro-pores formed by the pulp's solids, requiring great amounts of energy for recovery using conventional technologies, such as evaporation at high temperatures, or even, in extreme cases, the application of sufficiently high pressures to filter the water out mechanically.

ELECTRO-OSMOTIC DRAINAGE (EOD) allows the mobilization of water independently of the permeability

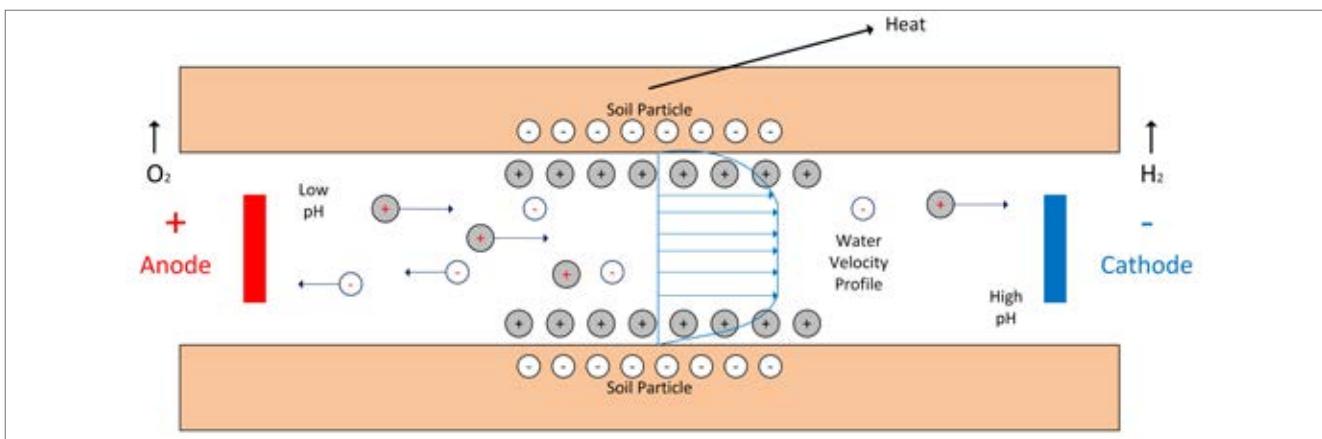


Figura 1. Esquema flujo electrocinético, al aplicar un campo eléctrico sobre un lodo, las moléculas de agua de éste fluyen desde el ánodo hacia el cátodo.

Figure 1. Schematic representation of the electrokinetic flow ensuing from the application of an electric field to a sludge. The water molecules contained in the sludge flow from the anode towards the cathode.

una presión lo suficientemente alta, para que de manera mecánica poder filtrarla.

Es en este contexto en el cual se propone el uso de **DRENAJE ELECTRO OSMÓTICO (DEO)**, para retirar el agua retenida capilarmente en el relave de una manera económica (unos 10-30 kWh por metro cúbico de agua recuperado), puesto que permite generar un flujo de agua independiente de la permeabilidad del medio.

El DEO es un fenómeno electrocinético, es decir, genera movimiento debido a la aplicación de electricidad, en este caso consiste en la aplicación de un campo eléctrico a un medio poroso (como es en este caso el relave). Al realizar esto, se forma una doble capa de iones alrededor de las partículas de lodo, por donde circula el agua retenida en dirección hacia el cátodo (electrodo negativo) (Valenzuela, Romero, Acuña, & Cánovas, 2016), como se observa en la **Figura 1** (Jones et al, 2008).

Con el fin de comprobar la eficiencia y los costos asociados a la **RECUPERACIÓN DE AGUA** mediante DEO, se construyó un prototipo a escala de laboratorio para realizar pruebas experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 MATERIALES

En este trabajo se utilizó una cámara de acrílico de 40x30x6 cm, con mallas de aluminio en la parte superior e inferior de la cámara como electrodos, cubiertas por tela filtro para disminuir el material particulado presente en el agua recuperada.

Se utilizó un generador de voltaje para aplicar el campo eléctrico al sistema, siendo el electrodo superior el ánodo

of the medium in which it is contained. Here, we propose the use of EOD for the cost-effective recovery of capillary-retained water from mine tailings, at ~10-30 kWh per cubic meter of recovered water. EOD is an electrokinetic phenomenon, i.e. it generates movement through the application of electricity. In this case, the application of an electric field to a porous medium, such as mine tailings. During EOD, a double layer of ions forms around sludge particles, through which the retained water is able to circulate towards the cathode (the negative electrode) (Valenzuela, Romero, Acuña, & Cánovas, 2016), as shown in **Figure 1** (Jones et al, 2008).

In order to assess the efficiency and cost of **WATER RECOVERY** by EOD, we performed a battery of tests using a laboratory scale prototype.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

We used a 40x30x6 cm acrylic chamber fitted with aluminum mesh electrodes at its top and bottom. In order to limit the presence of solid particles in the recovered water, the electrodes were covered by filter tissue.

A voltage generator was used to apply an electric field. The top electrode was the anode and the bottom electrode was the cathode. Consequently, the flow of



Figura 2. Prototipo escala laboratorio DEO. (a) Prototipo armado previo a la operación. (b) Prototipo tras operación, se observan grietas debido a la reducción de humedad.

Figure 2. Laboratory-scale prototype for EOD. (a) Prototype set up and ready for use. (b) Prototype after EOD. The sludge displays visible cracks due to its reduction of humidity.

y el inferior el cátodo, con el fin que el agua fluya hacia la parte inferior, donde la cámara posee orificios, con el fin de recuperar el agua electroosmotizada.

Como lodo se utilizó una mezcla de arcilla comercial Artel® con agua potable, con una humedad de alrededor del 60%, utilizando un volumen de alrededor de 5 litros.

2.2 METODOLOGÍA

En una primera prueba se aplicó un voltaje de 24 V al sistema, con un lodo generado con agua potable y arcilla, con el fin de medir como variaban las propiedades eléctricas del sistema durante 63 minutos.

En una segunda prueba se aplicó un voltaje de 4 V, con una corriente eléctrica inicial de 1,5 A que fue aumentando gradualmente durante 30 minutos hasta 1,8 A, utilizando un lodo generado con agua salada y arcilla, con el fin de emular los relaves mineros de las mineras que utilizan agua de mar como insumo. En la **Figura 2** se muestra el sistema utilizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estimar el consumo eléctrico del drenaje electro osmótico, se midió la corriente aplicada al sistema con el fin de estimar potencia eléctrica utilizada a lo largo de los distintos momentos de los experimentos, en la **Figura 3** se pueden observar dichas mediciones.

El primer ensayo es el que se realizó con una pasta conformada por agua potable y arcilla, en este ensayo la primera gota de agua cayó al minuto 48, esto se atribuye a que la tela filtro era de poro muy pequeño y además se encontraba seca antes de comenzar la experiencia, por lo

water was directed towards the outlets at the bottom of the chamber, thus enabling the recovery of the water extracted by electro-osmosis.

We used a sludge of commercially available Artel® clay mixed with drinking water, with a humidity of ~60%. The volume of sludge contained in the system was around 5 liters.

2.2 METHODS

In a first test, a voltage of 24 V was applied to a sludge of drinking water and clay, with the aim of monitoring the system's electric properties over the course of 63 minutes.

In a second test, a voltage of 4 V was applied, with an initial current of 1.5 A, which was gradually increased to 1.8 A over the course of 30 minutes, using a sludge of clay and sea water, in order to model the tailings of mines that rely on sea water. **Figure 2** shows the apparatus used.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In order to assess the electric consumption of electro-osmotic drainage, we recorded the current applied to the system, enabling us to estimate the electric power used over the time of the experiment. The results of our measurements are shown in **Figure 3**.

The first experiment was conducted on a mix of clay and drinking water. Here, the first drop of water was obtained 48 minutes into the experiment. This can be attributed to the fact that the filter tissue had very small pores; in addition, it was dry at the start of the experiment. It thus took a little

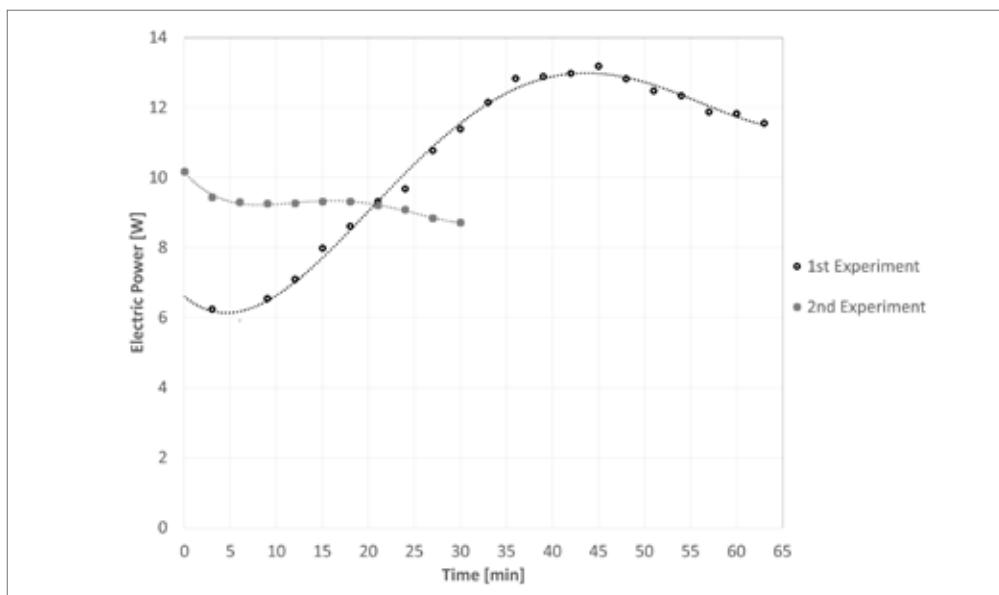


Figura 3. Potencia eléctrica aplicada al Sistema de drenaje electro osmótico en el tiempo.

Figure 3. Electric power applied to the electro-osmotic drainage system over time.

que demoró en mojarse y caer la primera gota, además de que al usar agua potable para formar el lodo se obtuvo una solución con baja conductividad ($591 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Por otro lado, en el segundo ensayo, las gotas de agua comenzaron a caer desde el minuto 1, recuperando un total de 96 mL de agua en 30 minutos, ya que en este se solucionó el problema de la tela filtro y además se usó agua salada con una conductividad de $32.5 \text{ mS}/\text{cm}$, debido a que a mayor conductividad del medio mayor es el flujo electro osmótico.

En el primer ensayo solo se recuperó unas pocas gotas de agua en los 60 minutos de operación, esto se atribuye a los problemas mencionados previamente. Es por esto se considerará inválido para calcular el consumo eléctrico del DEO. Por otro lado, en el segundo ensayo si se recuperó suficiente agua para realizar los cálculos, obteniéndose un consumo eléctrico de 36 kWh por metro cúbico de agua recuperada, esto estimando un costo de 60 USD por MWh se traduce en un costo de 2.16 USD por metro cúbico de agua recuperado, similar al coste de 2 USD por metro cúbico que conlleva el bombeo de agua desde el mar hasta una minera, aunque de igual forma, sigue siendo mayor.

4. CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado, se confirmó que recuperar agua mediante DEO es una opción comparable económicamente con las fuentes de agua actual para la minería chilena. Esto debido a que se logró recuperar agua con un consumo de 36 kWh/m^3 , lo que tiene un costo promedio de 2.16 USD/m^3 , similar a los 2 USD/m^3 que cuesta bombear agua desde el mar hasta la minera.

Otra ventaja que produce aplicar esta tecnología en las mineras chilenas es la reducción del volumen de los

while for the filter to get soaked and water to start dripping off it. Furthermore, the solution resulting from mixing drinking water with clay had a low conductivity ($591 \mu\text{S}/\text{cm}$).

During the second experiment, water started to drip from the first minute onwards, and a total of 96 mL water could be recovered over 30 minutes. This was partly due to the fact that the filter was now wet to start with. In addition, salt water with a conductivity of $32.5 \text{ mS}/\text{cm}$ was used, and a higher conductivity of the medium results in greater electro-osmotic flow.

In the first experiment, only a few drops of water could be recovered over the 60 minutes of the experimental run, due to the difficulties discussed above. It will thus be considered invalid for the calculation of the electric consumption of the EOD. Based on the second experiment, where enough water was obtained to calculate the electric consumption, we obtained a figure of 36 kWh per cubic meter of water. Assuming a cost of 60 USD per MWh, this translates into a cost of 2.16 USD per cubic meter of recovered water: similar, if slightly superior, to the cost of pumping seawater to a mine, which is of 2 USD per cubic meter of water.

4. CONCLUSIONS

Our results confirm that the cost-effectiveness of water recovery by EOD is comparable to that of other sources of water currently used in the Chilean mining industry. This is based on the obtained electric consumption of 36 kWh/m^3 and the associated average cost of 2.16 USD/m^3 , which is similar to the cost of 2 USD/m^3 attached to pumping sea water to the mine.

Another advantage of applying the EOD technology to the Chilean mining enterprise is that it implies a reduction

tranques de relaves, lo cual reduce la contaminación que producen estos al escurrirse hacia las napas subterráneas.

Para finalizar, a partir de los resultados obtenidos, surge necesario plantear como trabajo a futuro el modificar el diseño para aumentar la eficiencia y así lograr disminuir el consumo eléctrico a unos 10-20 kWh por metro cúbico de agua recuperada. Este aumento de la eficiencia también está ligado al uso de agua de mar en el proceso minero, ya que presenta las condiciones de conductividad eléctrica que favorece al drenaje electro osmótico.

En conclusión, el drenaje electro osmótico es una tecnología disruptiva que permite la recuperación del agua retenida capilarmente en lodos arcillosos, como lo son los relaves mineros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Sebastián Arriagada quien fue nuestro ayudante durante este proyecto, a los trabajadores del pañol del departamento de ingeniería química, que construyeron el prototipo para poder llevar a cabo las pruebas de laboratorio y a Magdalena Faúndez por su ayuda en la redacción de este manuscrito.

in volume of the mine tailings ponds, thus reducing the contamination caused by drainage into the groundwater.

Finally, based on our results, the necessary next steps should include the modification of our experimental design to improve its efficiency and thus reduce electric consumption values to around 10-20 kWh per cubic meter of recovered water. This increase in efficiency is also linked to the use of seawater in the mining process, since the electric conductivity of this water serves electro-osmotic drainage.

In conclusion, electro-osmotic drainage is a disruptive technology, which facilitates the recovery of capillary-retained water from clay-based sludges, such as mine tailings.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Sebastián Arriagada, who provided help with this project; the warehouse workers of the Department for Chemical Engineering, who built the prototype, thus enabling us to carry out our laboratory tests; and Magdalena Faúndez, for her help in writing this manuscript.

GLOSARIO

DRENAJE ELECTRO OSMÓTICO: proceso electro cinético en el cual se aplica un campo eléctrico mediante electrodos a un sólido húmedo, con el fin de que el agua que contiene escurra del ánodo al cátodo.

HUMEDAD: porcentaje en masa de agua presente en una pulpa, lodo o sólido, se puede clasificar como humedad libre y humedad ligada.

PULPAS RESIDUALES: materiales resultantes de los procesos de la minería que no son utilizados para obtener beneficios económicos debido a su bajo porcentaje de minerales de interés, son desechados.

RECUPERACIÓN DE AGUA: extracción y reutilización de agua que fue desechara junto a otras sustancias.

RETENCIÓN CAPILAR: agua que se encuentra en los poros y microporos de un sólido, debido a esta situación su presión de vapor es menor que el agua libre en las mismas condiciones, por lo que su extracción de manera tanto física como por evaporación conlleva altos gastos energéticos.

TRANQUE DE RELAVE: sitio en donde se desechan las pulpas residuales producto de los procesos mineros, son de grandes extensiones.

GLOSSARY

ELECTRO-OSMOTIC DRAINAGE: electrokinetic process, in which a pair of electrodes is used to apply an electric field to a humid solid, resulting in the flow of the contained water from the anode to the cathode.

HUMIDITY: mass percentage of water present in a pulp, sludge or solid. It can be classified as either free or bound humidity.

RESIDUAL PULPS: remains from the mining processes that are of no economic benefit due to their low content in the minerals of interest and are thus disposed of.

WATER RECOVERY: extraction and recycling of water disposed of together with other substances.

CAPILLARY RETENTION: the water locked into the pores and micro-pores of a solid has a lower water vapor pressure than free water under the same conditions; its extraction, either by mechanical means or by evaporation, carries a high energetic cost.

TAILINGS POND: disposal ground for the residual pulps from mining processes; these can cover a large area.

PRINCIPIO CIENTÍFICO

El drenaje electro osmótico es generado por la interacción eléctrica entre la superficie de partículas sólidas y el fluido, lo que lleva a una separación de cargas en la interface, llamada doble capa, produciendo un flujo en dirección del potencial eléctrico aplicado que depende de las propiedades de la doble capa, la composición del sólido y del fluido, la geometría de los poros y el potencial aplicado, lo cual se puede expresar según la ecuación de Helmholtz-Smoluchowski:

$$q_e = \frac{n\epsilon\xi}{\eta} \frac{\Delta V}{\Delta L}$$

Donde q_e es el flujo electro osmótico, n a la porosidad del sólido, ϵ la permitividad eléctrica del lodo, ξ el zeta potencial, η la viscosidad dinámica del fluido, ΔV el potencial eléctrico aplicado y ΔL la distancia entre electrodos. (Valenzuela, Romero, Acuña, & Cánovas, 2016)

En la **Figura 4** se puede observar la doble capa formada alrededor de la partícula de sólido y la distribución de cargas, esta capa consiste en la capa de Stern y la capa de difusión. (Iwata, Tanaka, & Jami, 2013).

La naturaleza fenomenológica del drenaje electro osmótico permite retirar el agua retenida capilarmente en un lodo de manera independiente de su permeabilidad, por lo que es la única tecnología capaz de realizar esto de manera eficiente energéticamente.

SCIENTIFIC PRINCIPLE

Electro-osmotic drainage is powered by the electrical interaction between the surface of a solid particle and a liquid. This interaction leads to a separation of charges at the interface, called the double layer, and produces a flow in the direction of the electrical potential applied, which depends on the characteristics of the double layer, the composition of both solid and liquid, the geometry of the pores and the applied potential, as expressed by the Helmholtz-Smoluchowski equation:

$$q_e = \frac{n\epsilon\xi}{\eta} \frac{\Delta V}{\Delta L}$$

Where q_e is the electro-osmotic flow, n the porosity of the solid, ϵ the electric permittivity of the sludge, ξ the zeta potential, η the dynamic viscosity of the liquid, ΔV the electric potential applied, and ΔL the distance between electrodes (Valenzuela, Romero, Acuña, & Cánovas, 2016).

Figure 4 shows the formation of a double layer around the solid particles and the charge distribution within this double layer, which comprises the Stern layer and the diffusion layer (Iwata, Tanaka, & Jami, 2013).

The nature of electro-osmotic drainage allows the extraction of capillary-retained water from a sludge in a way that is independent of sludge permeability, thus making EOD the only technology capable of achieving the recovery of water in an energetically efficient way.

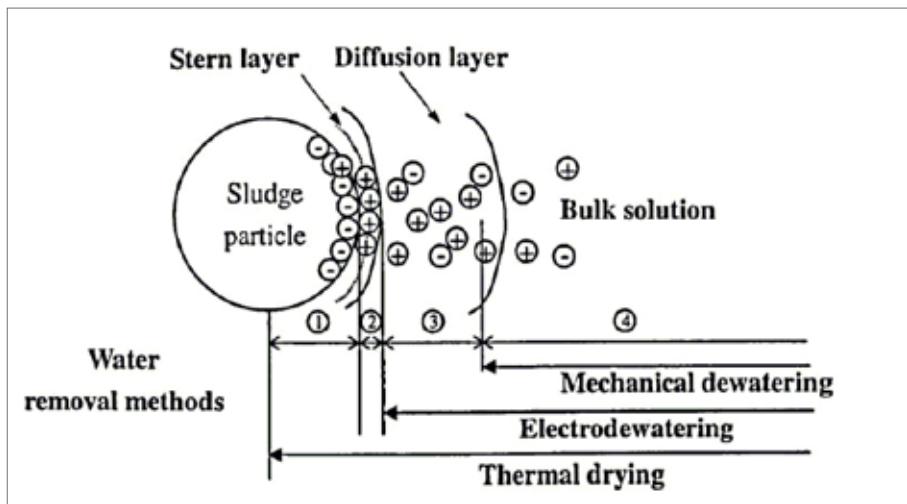


Figura 4. Formación de una doble capa alrededor de una partícula de lodo al aplicar una diferencia de potencial, entre las capas de Stern y de difusión se produce un flujo de agua debido al drenaje electro osmótico.

Figure 4. Formation of a double layer around a sludge particle upon application of a potential difference. Electro-osmotic drainage builds up a flow of water between the Stern layer and the diffusion layer.

REFERENCES

- Iwata, M., Tanaka, T., & Jami, M. S. (2013). Application of Electroosmosis for Sludge Dewatering - A Review. *Drying Technology*, 31, 170-184.
- Jones, C. J., Lamont-Black, J., Glendinning, S., Bergado, D., Eng, T., Fourie, A. & Yan-Feng, Z. (2008). Recent Research and Applications in the use of Electro-Kinetic Geosynthetics. *4th European Geosynthetics (EuroGeo4)*. Edinburgh, U.K.
- Valenzuela, J., Romero, L., Acuña, C., & Cánovas, M. (2016). Electroosmotic drainage, a pilot application for extracting trapped capillary liquid in copper leaching. *Hydrometallurgy*, 163, 148-155.

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Camilo
Valencia



Andrés
Collado



Claudio
Acuña