Estudio del mejoramiento de la capacidad de retención de agua de residuos mineros, orientado a favorecer el desarrollo de vegetación

Galo Muñoz V.[1], Ariel Martínez A.
[1]Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia
[1]galomunoz.v@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El propósito de este trabajo es estudiar la modificación a la composición de los residuos mineros estériles de la mina BAREMSA, localizada en la zona andina de Bolivia, a través de la incorporación de arcilla de un banco de préstamo cercano y el añadido de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Oruro, de manera que se mejore la capacidad de los residuos para retener humedad y favorecer el crecimiento de la vegetación nativa. Al efecto, se han caracterizado físicamente los residuos mineros, las arcillas y los lodos de la PTAR y luego se implementaron mezclas de ellos para formar columnas experimentales de laboratorio. Diez pruebas de infiltración fueron ensayadas en las columnas para distintas proporciones de residuos, arcilla y lodo. Los resultados muestran que la incorporación de arcillas y lodos mejora el almacenamiento de humedad de los residuos; particularmente, la combinación óptima para la retención de agua se halla en torno al 10% de arcillas con 12% de lodos. Los resultados son alentadores y se pone esta técnica a consideración de la empresa minera como una opción más en apoyo a las labores de remediación después del cierre de sus actividades industriales.

Palabras clave: *Contaminación, Residuos mineros, Retención de humedad, Remediación.*

1. Introducción

La composición natural adquirida por los suelos a lo largo del tiempo geológico está siendo alterada por la acción antrópica. Un claro ejemplo es la actividad agrícola extendida sobre amplias superficies de la Tierra o por la actividad minera, en forma puntual. Particularmente, en este último caso, se considera que existe una degradación de las propiedades físico-químicas de los residuos mineros que les hace inadecuados para continuar cumpliendo su función de alojamiento y desarrollo para la vida.

Este caso de la minería es motivo de preocupación ambiental porque parte de los residuos del proceso industrial de extracción de minerales de buen número de minas en Bolivia (Escalera, 2018), quedaban dispuestos precariamente en torno a la bocamina sin oportunidad de ser recuperados y ser restituidos como potencial albergue para la flora y la fauna andina.

Al impulso de la Ley de Medio Ambiente, el Estado Boliviano está destinando mayor atención y esfuerzos para enfrentar los problemas ambientales de degradación, contaminación y deterioro de la naturaleza y los recursos naturales. En línea con esta intención estatal, la Universidad Mayor de San Simón de Cochabamba, la Universidad Técnica de Oruro y con el apoyo financiero de la Cooperación Técnica Suiza, se han propuesto estudiar los elementos conceptuales y metodológicos para formular medidas de adecuación de los suelos de los residuos de la mina Barex Empresa Minera S.A. (BAREMSA) orientadas a mejorar su composición, tal que favorezcan la revegetación de la zona, y que ésta experiencia, según su éxito, pueda ser replicada para otras minas en el país que se hallen también en proceso de cierre de actividades.

Por ello el propósito específico de esta investigación es ganar conocimiento sobre el proceso de infiltración y almacenamiento del agua en los suelos de los relaves de la mina BAREMSA, tal que permita definir la proporción de arcilla y lodos de la Planta de Tratamiento de Oruro que deben añadirse al relave minero a fin de proporcionar a los suelos mejores condiciones para la retención del agua

Una opción para estudiar las medidas de remediación era de implementarlas en los residuos mineros in situ. No obstante, de las claras ventajas de ello, se conoce que el tratamiento in situ es caro y de largo aliento. En lugar de ello se eligió estudiar los residuos mineros en columnas experimentales de laboratorio a fin de conocer los parámetros que controlan la movilidad y la retención de agua en el suelo.

Los experimentos en columnas son una técnica bien establecida y se los utiliza para deducir los parámetros que gobiernan el proceso de transporte de solutos inorgánicos en el suelo, tal como lo señala Muhammad

(2017) o Banzhaf & Hebig (2016), o para estudiar compuestos orgánicos en suelos agrícolas (Grondona et al, 2013). Pero las columnas se utilizan también para definir técnicas de remediación en la actividad minera. Por ejemplo, Dubikovă et al., (2002) emplea columnas para investigar la interacción de agua ácida proveniente de una mina en Slovakia con el suelo del entorno; estudia el pH del suelo y la retención de elementos químicos arrastrados por el agua a través de las columnas de suelo bajo diferentes condiciones de carga del lixiviado; o como el caso de García & Álvarez (2008) en que emplearon columnas para estudiar la capacidad de absorción de plomo, cobre zinc y cadmio de un suelo. Estos autores comparan estos resultados cuando le añaden al suelo un sorbente obteniendo resultados expectables. También está el caso de Salinas (2012) que investiga los lixiviados de metales pesados desde suelos acidificados y los coteja con resultados de columnas experimentales de suelos de una mina en Japón en ánimo de formular medidas de remediación ante posible contaminación generada por el cierre de la mina.

2. Métodos

La zona de estudio se halla ubicada en la parte noroccidental de la ciudad de Oruro, Bolivia, por efecto del ritmo de la expansión urbana, la mina ha quedado en un área periurbana. El área de interés específico, dentro de la concesión de la minera BAREMSA, queda en la falda baja de la estribación noroccidental del cerro Colorado. Los escarpes que la rodean exhiben los signos de la actividad minera que data de muchos años. Antes de la concesión a BAREMSA, la empresa minera estatal COMIBOL tenía una bocamina y un ingenio para beneficiar el mineral extraído y un sitio para disponer del material que ya no era beneficiable. El clima de la zona corresponde al de estepa con invierno seco y frío (Bswk) según la clasificación de Köppen & Wegener (1924). La vegetación es escasa y se restringe a la nativa local. La precipitación en promedio anual es de 419 mm/año, según datos provenientes de la estación Cabaña Forestal del SENAMHI. Aunque las lluvias son frecuentes en el año, sin embargo, se caracterizan por concentrarse entre los meses de diciembre a marzo. En el resto del año la temperatura es fría y ocasionalmente caen nevadas particularmente en los meses de invierno. En base al estudio de los datos de precipitación se deduce que: a) las lluvias que duran pocos momentos, apenas si pudieren humedecer los primeros centímetros del suelo. La lluvia caída y que no es transformada en escurrimiento directo, es retenida por el suelo para luego ser evaporada sin mayor oportunidad de infiltración, b) las lluvias que duran dos o más horas son las que ofrecieran mayor oportunidad para el humedecimiento y almacenamiento en el subsuelo brindando ocasión para el desarrollo a la vegetación y c) en promedio, los eventos que duran entre 2 a 3½ horas tienen una lámina de 6.3 mm por tormenta.

Caracterización del suelo de los relaves

El trabajo de campo consistió en el muestreo de suelos de los residuos de la mina BAREMSA. Por información recabada de la división ambiental de la minera, los residuos acumulados en la vecindad del ingenio fueron repartidos uniformemente por el terreno adyacente para conformar una pequeña planicie. Las coordenadas de los puntos de ensayos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo de suelos de los relaves

Punto	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (msnm)
1	696989	8012556	3745
2	696911	8012705	3748
3	696848	8012940	3747
4	696825	8013039	3744

Nota: msnm es metros sobre el nivel del mar

Se han identificado dos horizontes de suelo en el perfil de las calicatas. El más superficial está conformado por material grueso proveniente de los residuos. Este material es clasificado granulométricamente en campo como arena con grava y con presencia de limo de color gris claro. Este suelo se halla en los puntos de muestreo P2, P3 y P4. Subyace al primer horizonte una delgada capa de suelo de 3 cm de coloración gris obscuro. Este material se halló en los puntos 3 y 4 únicamente. El estrato inferior está conformado por arena limosa e inclusive arcilla magra de granulometría más o menos uniforme y de coloración rojiza. Las calicatas practicadas no alcanzaron el basamento de este estrato. Cuando se practicaban las calicatas, de este estrato emanaba un olor característico y sintomático de presencia de ácidos. La información que se presenta en la Tabla 2 sintetiza los resultados del Laboratorio de Geotecnia de la UMSS procesando las muestras de suelo obtenidas en los Puntos 1 al 4.

Tabla 2

Textura y granulometría de los residuos de BAREMSA en los puntos seleccionados

Horizonte	Profundida (m)	% Grava	% Arena	% Finos	Gs	ρ_d	γ	D_{60}	D_{30}
1A	0.4	0.23	5.29	94.47	2.42	1.29	16.12	SMF	SMF
2A	0.35	7.09	53.53	39.39	-	1.56	17.12	0.12	SMF
2B	0.86	1.66	53.57	44.77	2.72	-	-	0.11	SMF
2C	1.3	1.9	73.74	24.36	-	-	-	0.16	0.08
4A	0.35	43.04	34.84	22.12	2.84	1.76	17.79	5.53	0.52
4B	0.53	1.97	30.31	67.72	2.96	-	-	SMF	SMF
4C	superficial	5.33	64.03	30.64	2.4	-	-	SMF	SMF

Nota: Gs gravedad específica; ϱ_d densidad aparente, γ peso unitario (kN/m^3); SMF, Suelo Muy Fino

En la Tabla, ϱ_d y γ simbolizan la densidad aparente y γ el peso unitario húmedo del suelo en gr/cm^3 y kN/m^3 respectivamente. La descripción para los horizontes son arcilla magra (CL), arena limosa (SM) y arena mal gradada con finos (SP) respectivamente. Ensayos de infiltración se realizaron aplicando el método de la doble anilla, hallándose valores de 17, 1.23, 5.33 y 0.66 m/d de conductividad hidráulica saturada para los Puntos 1 al 4 respectivamente. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos en los ensayos *in situ*, reportan valores que quedan comprendidos dentro de los rangos habituales para los tipos de suelo hallados: suelos con presencia de grava, arena y finos.

Columnas experimentales para el acondicionamiento del suelo de los residuos

En instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la UMSS se construyó una estructura metálica y de madera como soporte de las columnas experimentales y su sistema de alimentación de agua. Las columnas consisten en tuberías de PVC de 6" Clase 6 con diámetro interior nominal de 15 cm. Una columna está conformada por dos piezas de PVC ensambladas herméticamente. A través de las columnas se deja pasar una cantidad determinada de agua manteniendo en la parte superior 6 cm de lámina constante de agua. Las columnas son alimentadas por los recipientes dispuestos en la parte alta. De ellos descienden mangueras que trasladan el fluido a cada columna. Se dispone de un sistema de evacuo de agua excedente, a manera de reservorio con nivel constante, para imponer la lámina de agua especificada. Lateralmente a las columnas, tres sensores de humedad son conectados a distintas alturas. Al pie de cada columna, se dispone de un matraz de laboratorio graduado con objeto de colectar el agua drenada. En cada matraz se instala un medidor de nivel de agua para registrar el acumulo del agua drenada.

Tres orificios separados cada 8 cm fueron practicados en la tubería de PVC con el objeto de introducir los sensores de humedad. Los sensores están localizados de la manera siguiente: contando desde la parte superior de la columna de suelo el primer sensor está a 3 cm del tope del suelo; el segundo sensor está a 11 cm del tope del suelo mientras que el último se dispone a 19 cm del tope. Por debajo de él, quedan 8 cm de columna de suelo antes de alcanzar el fondo.

Los sensores de humedad son de marca ECH_2O y modelo EC-5 de procedencia estadounidense, la precisión de lectura, según el fabricante, es de 3%. Los sensores son conectados al data logger HOBO para el monitoreo de los cambios de humedad en las columnas. Antes de las pruebas experimentales los valores de humedad detectados por los instrumentos ECH_2O fueron contrastados con los registrados por el equipo FieldScout TDR 100 del LHUMSS, reportando lecturas de humedad muy similares, aspecto que otorga confianza en los datos registrados.

Al pie de cada columna se tiene dispuesto el recipiente colector mencionado para cuantificar el agua drenada de las columnas. Dentro del colector se instaló un registrador de nivel de agua, levelogger de la marca Solinst Modelo 3001 de precisión de 0.05%, para el

rango de medición de 10 m. Conociendo el área transversal del recipiente prismático, y la altura de agua registrada, se deduce el volumen infiltrado en todo momento.

El suelo a ser estudiado es mezclado a fin de conseguir una muestra representativa y apropiadamente homogenizada en sus partes componentes: residuos, suelo fino y materia orgánica. La mezcla así formada es acomodada en el fondo del tubo de PCV. El material es apisonado con 5 golpes de maza de 2 kg con propósito de reproducir la densidad observada en campo y de acuerdo con lo señalado en la Tabla 2.

En el estudio se ha partido del principio de que, cuanto mayor material fino se añada al relave minero mayor retención de agua habrá en los horizontes de suelo. La posibilidad de combinación de relave y finos es múltiple, sin embargo, se presentan únicamente las señaladas en la Tabla 3.

Tabla 3

Composición (%) del suelo de las columnas ensayadas experimentalmente

	100R	**10A-90R**	**25A-75R**	**40A-60R**	**10A-12L-78R**	**25A-30L-45R**
Componente	**1**	**2**	**3**		**4**	**5**
Arcilla	0	10	25	40	10	25
Lodos	0	0	0	0	12	30
Residuos	100	90	75	60	78	45

Los códigos que aparecen en la mencionada tabla se refieren a las distintas composiciones de suelo formado. Los símbolos empleados como A, L y R hacen referencia a arcillas, lodos de la PTAR y el propio residuo de la mina. Por ejemplo, 100R significa suelo conformado por 100% del residuo minero; 10A-90R expresa que se formó el suelo empleando 10% de arcilla mas 90% residuo minero; 10A-12L-78R significa que se formó el suelo empleando 10% de arcilla, 12% de lodos de la Planta de Tratamiento y 78% del material de relave.

Se formuló un programa de pruebas consistente en la variación de arcilla, lodos y relave minero, adicionales a las que figuran en la Tabla 3. En todas las pruebas se registraron volúmenes de agua, tiempo de infiltración, la retención, grado de humedecimiento del medio poroso, etc. tal como se muestran en los resultados.

3. Resultados y Discusión

En este acápite se efectúa una síntesis, en forma de gráficos y tablas de los resultados obtenidos. Para la fácil interpretación de los gráficos se presenta un esquema de una curva de humedecimiento en la Figura 1 correspondiente a un determinado punto de la columna experimental. En las abscisas del gráfico se registra el transcurso del tiempo conforme el suelo se humedece (ordenadas). El máximo humedecimiento (saturación) que se alcanza corresponde al punto pico de la curva. En este trabajo, el gráfico de humedad se ha querido simplificar con la composición de cinco rectas que unen puntos característicos. Tales puntos son: (T_0; θ_r) la humedad natural de la mezcla de suelos antes de efectuar el ensayo; (T_1; θ_1) el punto donde el humedecimiento se inicia a ritmo intenso; el punto (T_2; θ_2) cuando decrece la tasa de humedecimiento antes de alcanzar la saturación (T_3; θ_3). El punto (T'_3; θ'_3) es aquel en que la alimentación de agua desde el reservorio hacia la columna no se corta aún y se mantiene saturado el suelo. En el momento que cesa el flujo de agua hacia la columna, se inicia la curva de recesión drenando por gravedad el agua almacenada en los poros del suelo. El punto (T_4; θ_4) marca el decrecimiento en el ritmo del drenaje previo a alcanzar una tasa similar a flujo estacionario (T_5; θ_5). Finalmente, en el largo plazo, la humedad del suelo θ_5 decrecerá hasta llegar eventualmente a la capacidad de campo θ_{cc} y muy posteriormente al punto de marchitez permanente θ_{pmp}.

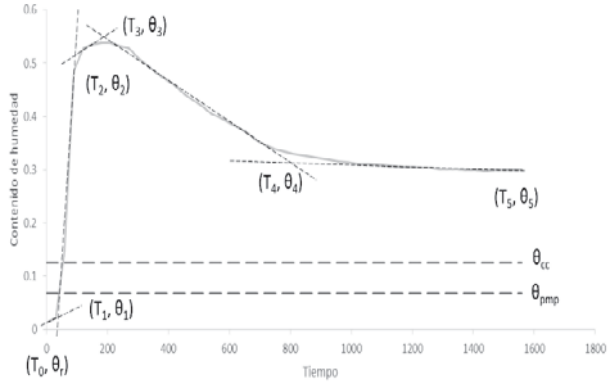

Figura 1. Curva de humedecimiento de una columna de suelo, definiendo puntos particulares en el tiempo T y humedad θ del suelo. Se añaden la capacidad de campo y el punto de marchitez

Se hace notar que, en algunos casos, el punto (T_5, θ_5) puede no existir en el experimento. Ello ocurre cuando se trata de una mezcla con predominancia de finos en cuyo caso no se alcanza el estado permanente de drenaje. (T_4, θ_4) no existirá si el suministro de agua desde el tanque de alimentación no se corta y el flujo continúa sin que ocurra la recesión.

A continuación, se presenta un gráfico (ver Figura 2) mostrando las curvas de humedecimiento registradas por el sensor 1. En el gráfico se exhiben las curvas de humedecimiento para cada combinación de arcilla, lodos y residuos estudiada, de acuerdo al código definido en la Tabla 3 y conforme los colores siguientes.

a) Residuo minero únicamente (100R), línea de color negro

b) Combinación de residuo y arcilla en tres proporciones:

- 10% arcilla y 90% residuo (10A-90R), línea color marrón
- 25% arcilla y 75% de residuo (25A-75R), línea color rojo
- 40% de arcilla con 60% de residuo (40A-60R), línea color amarillo

c) Inclusión de lodos en la mezcla de suelo:

- 10% de arcilla más 12% de lodos con 78% de residuo minero (10A-12L-78R), línea color verde
- 25% de arcilla con 30% de lodos y 45% de residuo (25A-30L-45R), color azul

Al pie de las gráficas se acompaña los valores numéricos obtenidos en cada experimento. La Tabla 4 muestra resultados para el sensor 1.

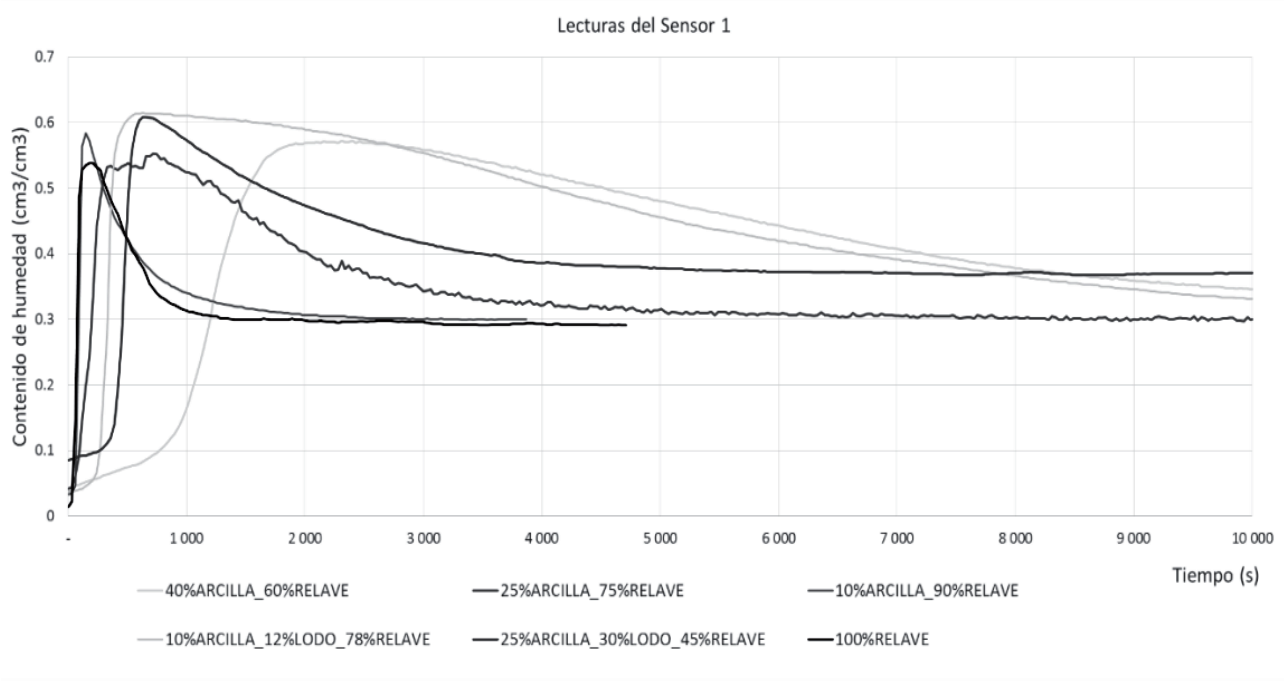

Figura 2. Curvas de humedecimiento en el tiempo para muestra consistente de residuo únicamente, y curvas para cinco combinaciones de arcilla, lodos y residuo minero. Los datos presentados corresponden a los registrados por el sensor 1.

Donde: Tiempo a humedad residual T_0, Inicio del ascenso rápido T_1, Fin del ascenso rápido T_2, Inicio de la saturación – pico T_3, corte de la alimentación - Fin saturación T_3´, Fin del drenaje inmediato T_4, Fin drenaje diferido T_5, Rapidez de infiltración (m/d) r, Tiempo de saturación $T_3 - T_1$, Tiempo de drenaje inmediato $T_4 - T_3$, Tiempo de drenaje rezagado $T_5 - T_4$, Humedad drenable inmediatamente $\theta_3 - \theta_4$, Humedad de drenaje diferido $\theta_4 - \theta_5$, Humedad drenable a corto plazo $\theta_5 - \theta_{cc}$, Humedad aprovechable por las raíces de las plantas $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$.

Tabla 4

Parámetros de los hidrogramas de humedecimiento, registrados por el sensor 1

Pará-	**40A-60R**		**10A-90R**		**25A-75R**		**10A-12L-78R**		**25A-30L-45R**		**100R**	
metro	T(s)	θ (-)	T (s)	θ (-)	T (s)	θ (-)	T (s)	θ (-)	T (s)	θ (-)	T (s)	θ (-)
T_0	0	0.042	0	0.034	0	0.042	0	0.037	0	0.085	0	0.014
T_1	900	0.125	60	0.047	60	0.061	270	0.106	420	0.196	60	0.15
T_2	1500	0.494	120	0.564	330	0.532	420	0.578	540	0.558	120	0.487
T_3	2160	0.571	150	0.584	720	0.553	630	0.615	660	0.609	180	0.539
T_3'	2160	0.571	150	0.584	720	0.553	630	0.615	660	0.609	210	0.539
T_4	8670	0.364	630	0.387	2700	0.362	9150	0.343	3510	0.399	810	0.331
T_5	14940	0.324	3870	0.300	14940	0.295	13020	0.305	14940	0.369	4740	0.291
r	2.88		43.20		43.20		9.60		6.17		43.20	
$T_3 - T_1$	1260		90		660		360		240		120	
$T_4 - T_3$	6510		480		1980		8520		2850		630	
$T_5 - T_4$	6270		3240		12240		3870		11430		3930	
$\theta_3 - \theta_4$		0.207		0.196		0.191		0.272		0.209		0.208
$\theta_4 - \theta_5$		0.041		0.087		0.067		0.038		0.031		0.040
$\theta_5 - \theta_{cc}$		0.197		0.167		0.147		0.168		0.272		0.174
$\theta_{cc}-\theta_{pmp}$		0.057		0.063		0.071		0.067		0.050		0.059

Similares curvas se obtuvieron para los sensores 2 y 3 localizados a mayor profundidad dentro de la columna de suelo. Seguidamente se formulan criterios para discernir qué combinación de arcilla, lodo y relave minero se presenta como favorable para el acondicionamiento del suelo:

a.1) Cuanto más pronto infiltre el agua en los primeros centímetros del suelo, por efecto de una lluvia o riego artificial, mayor oportunidad habrá para que el perfil vertical de suelo se humedezca también

a.2) Lo contrario, cuanto más demore el agua caída sobre la superficie del suelo en infiltrar, habrá mayor opción para que se encharque, se evapore o escurra superficialmente, disminuyendo la oportunidad para humedecer el subsuelo.

b.1) Cuanto más tiempo dure el drenaje de la humedad almacenada en el suelo, mayor tiempo dispondrán las raíces de las plantas para extraerla y desarrollar su proceso biológico

b.2) Lo contrario, si el drenaje es breve, el suelo perderá humedad rápidamente y las raíces tendrán menos oportunidad para extraerla.

c) Cuanta mayor sea la diferencia entre la humedad inicial y la final, mayor será el almacenamiento de agua en el subsuelo. Se distinguen dos fases: c.1) el drenaje inmediato que ocurre de la diferencia entre θ_3 y θ_4 y c.2) el drenaje diferido resultado de $\theta_5 - \theta_{cc}$.

d) La diferencia entre θ_{cc} y θ_{pmp} marca la humedad que el suelo retiene contra la acción de la gravedad. Esa presencia de agua intersticial se iniciará cuando termine el drenaje gravífico y paulatinamente irá disminuyendo la humedad en el largo plazo. Está humedad estará disponible para su extracción desde las raíces.

Los criterios así formulados fueron operativizados a través de una ponderación a cada mezcla de arcilla, lodos y relave minero estudiada. La expresión que califica al suelo es:

$$PT = 2 \times a + 1 \times b + 1 \times c1 + 1 \times c2 + 2 \times d$$

Donde PT simboliza a la ponderación total obtenida. Cuanto mayor sea, mejor acondicionamiento se espera. Por otra parte, a, b, c1, c2 y d son los identificativos de los criterios antes propuestos. Los coeficientes que los preceden son pesos que a cada criterio se les ha querido otorgar.

La Tabla 5 sumariza la cualimetría realizada y obtiene un valor ponderado total. El resultado final destaca que los suelos que incluyen lodos, 10A-12L-78R e inclusive 25A-30L-45R son los mejores candidatos para ser considerados en el acondicionamiento.

Tabla 5

Cualimetría aplicada a la selección del suelo más apropiado al acondicionamiento

Suelo / Variable	Favorables	Desfavorables	TOTAL
100R	3	4	**-1**
10A - 90R	5	2	**3**
25A - 75R	5	2	**3**
40A - 60R	4	3	**1**
10A - 12L - 78R	6	1	**5**
25A - 30L - 45R	5	2	**3**

4. Conclusiones

En base a lo estudiado, se puede concluir que: el material del relave minero de BAREMSA no ofrece condiciones favorables para la retención de agua entre sus poros debido a su elevada permeabilidad. Si se añade arcilla, se incrementa la retención, pero puede constituirse en limitante para la infiltración del agua desde la superficie debido a su conductividad hidráulica.

Pero si a la mezcla se añade materia orgánica, las condiciones de textura mejoran incrementando la percolación y sin perder notablemente su capacidad de retención de humedad. En la investigación se ha comprobado que una combinación cercana a 10% de arcilla con 12% de lodos de la PTRA reportan resultados muy alentadores para el acondicionamiento de suelo en perspectivas del desarrollo de la vegetación nativa.

No obstante, de los resultados alcanzados, ellos están limitados por la escala del experimento y no son directamente transferibles a campo pues algunos parámetros son intrínsecos al flujo en las propias columnas. Por ello, los resultados que se hallaron en esta investigación deben ser apropiadamente aquilatados y considerados como orientativos para la toma de decisiones para propósitos ambientales.

5. Referencias Bibliograficas

Banzhaf, S., & Hebig, K. (2016). Use of column experiments to investigate the fate of organic micro pollutants - A review. *Hydrology Earth Sustem Science Journal, 20*, 3719 - 3737.

Dubiková, M., Cambier, P., Sucha, V., & Caplovic, M. (2002). *Experimental soil acidificaton*.

Escalera, R. (2018). Contaminación Minera en Bolivia: alternativas de remediación de aguas ácidas. *Revista Investigación y Desarrolllo Nro 4*.

García, A., & Álvarez, E. (2008). Soil remediation in mining polluted areas. *Department of Environmental Geochemistry IRNASA*.

Grondona, S., Martínez, D., Benavente, M., Gonzales, M., Massone, H., & Miglioranza, K. (2013). Determinación de parámetros hidráulicos en columnas experimentales de suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Facultativa de Ciencias Agrarias, 45*(2).

Köppen, W., & Wegener, A. (1923). *Die Kimate der geologischen*. Gebruder Borntraeger.

Muhammad, Z., Zhang, W., Hongbin, Z., Xiaolian, C., & Menggui, J. (2017). An Esperimental Study on Solute Transport in One-Dimensional Clay Soil Columns. *Journal of Geofluids, 17*. doi:6390607

Salinas, O. (2012). Effecto of remediation of acid surface soil on acid mine drainage at a closed mine. *Field Engineering for Environment Division - Master Dissertation*.