Evaluación de un filtro vegetacional para el control de la erosión en faenas mineras abandonadas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
Daniela Cabrera[1], Alumna de cuarto año
Carlos Bonilla[1], Profesor asociado
[1] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

INTRODUCCIÓN

La protección del medio ambiente luego de la etapa de cierre de faenas mineras es un tema de creciente preocupación. Entre otros aspectos, esto se debe a los efectos asociados a la erosión y arrastre de los materiales provenientes de estas faenas [1]. Debido a esto, en los países desarrollados el plan de cierre o de recuperación de sitios mineros habitualmente considera el uso de modelos de simulación para la evaluación del impacto ambiental y el comportamiento del sitio en el mediano y largo plazo [2].

Dentro de los modelos de simulación más utilizados para el estudio de la erosión hídrica en sitios mineros destaca el Water Erosion Prediction Project WEPP [3]. Después de numerosas validaciones, el modelo WEPP ha probado ser una herramienta útil tanto para evaluar los efectos del clima y la condición del sitio como también la efectividad de los filtros vegetacionales en la reducción de la erosión [4].

En el caso particular de Chile, existen más de 440 faenas mineras abandonadas las cuales se cerraron sin tomar las medidas de seguridad hoy exigidas [5]. Por otra parte, el 49% del territorio nacional presenta algún grado de erosión en los suelos [6]. De esta forma, la combinación de factores climáticos y la presencia de materiales fácilmente erodables aumentan la probabilidad de ocurrencia de problemas ambientales de este tipo.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: a) estimar la erosión en una antigua azufrera ubicada en el extremo norte de Chile mediante un modelo de

simulación de procesos biofísicos y b) evaluar los efectos de un humedal existente a los pies del depósito minero en la reducción de la producción de sedimentos.

METODOLOGÍA

El sitio estudiado corresponde a la antigua azufrera en Aguas Calientes (Figura 1), a los pies del volcán Tacora, en el origen del río Azufre (17°43'26" S, 69°49'14" W, 4486 m.s.n.m.). El material del depósito es rico en azufre y presenta también otros elementos como titanio, calcio y fierro en menor proporción. Para modelar la erosión en la ladera formada por el depósito minero se utilizó el modelo WEPP versión 2010.1. El modelo WEPP permite modelar y evaluar seis componentes del sistema: clima, hidrología, vegetación, suelos, topografía y erosión/sedimentación.

Figura 1: Vista general del humedal y entorno de las faenas abandonadas. El humedal se encuentra en la parte baja del valle (a) y el sitio de acopio de material se encuentra a un costado (b). En el sector se observan los efectos de la erosión hídrica en las laderas cercanas al depósito (c), y parte del sedimento es atrapado por el humedal antes de alcanzar el curso de agua (d).

Como datos climáticos se emplearon los registrados en las estaciones Villa Industrial y Putre de la Dirección General de Aguas. Se utilizaron los valores diarios de temperaturas y precipitaciones del período 1980-2009 (30 años). Mediante el componente de hidrología se calculó la infiltración, el escurrimiento superficial, la evapotranspiración y la percolación profunda. El comportamiento de la vegetación se modeló en base a un análisis visual en terreno y parámetros de crecimiento. Para este cálculo se empleó la radiación solar y el contenido de humedad del suelo, además de parámetros específicos de las plantas tales como la temperatura basal y de congelamiento. El largo promedio del humedal entre el río y el depósito minero se estimó en 30 m.

Para caracterizar el componente de suelo se tomaron muestras representativas del material del depósito y se analizaron en laboratorio. Mediante el modelo se ajustaron las propiedades del suelo a los procesos de congelamiento, deshielo y asentamiento de los materiales. La información topográfica se obtuvo a partir de un levantamiento detallado realizado en el lugar con un equipo GPS y se trazaron curvas de nivel para identificar los cambios de pendientes en el depósito. En base a esto se definió en WEPP un área de 195 m de largo por 80 m de ancho, donde los primeros 165 m corresponden a material de acopio y los 30 m inferiores al filtro vegetacional.

La erosión hídrica en el depósito se estimó mediante el componente de erosión/sedimentación de WEPP, resolviendo la ecuación de continuidad en 100 nodos a lo largo de la ladera (ver recuadro sobre Principio Científico). Cada una de las condiciones que afectan la erosión y sedimentación se actualizaron a escala diaria en el modelo. Dentro de estas condiciones se consideró la densidad aparente del material, la conductividad hidráulica, la rugosidad superficial y la erodabilidad del terreno. La distribución del tamaño de partículas del sedimento se calculó en cada nodo y en el material depositado a los pies de la ladera.

Para evaluar el efecto del filtro vegetacional en la entrega de sedimento se realizó un análisis de sensibilidad para distintos largos del humedal comparando su condición actual (30 m) con largos mayores y menores. La evaluación se realizó en base a la cantidad de material erodado depositado en el río.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Empleando datos reales de precipitaciones, temperaturas, composición del depósito, topografía y características de la vegetación del humedal fue posible reconstruir el registro de erosión en el depósito minero para los últimos 30 años, cuantificar el aporte de material al río y evaluar el rol del humedal como filtro vegetacional.

En la Figura 2 se presentan las precipitaciones empleadas y la estimación del escurrimiento superficial y erosión para el período 1980–2009. Las precipitaciones en el lugar responden a la presencia del invierno altiplánico y se concentran entre los meses de diciembre y febrero. La mayoría de las precipitaciones son del orden de 10 a 20 mm/día, sin embargo se registran numerosos eventos de 30 mm/día, incluso uno de 70 mm en 24 horas. Esta alta variabilidad confirma la necesidad de utilizar un registro de precipitaciones extenso para obtener una estimación representativa de los agentes erosivos.

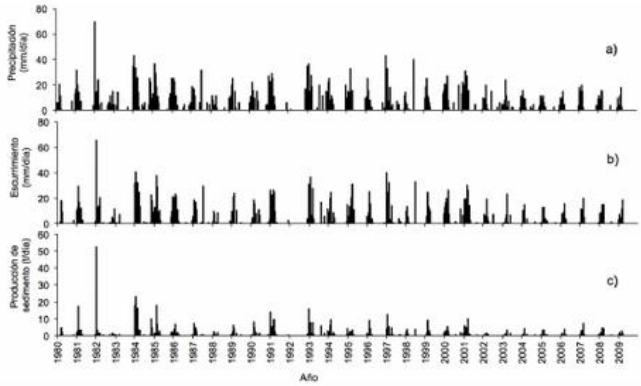

Figura 2: Registro diario de precipitaciones (a), estimación del escurrimiento superficial (b) y producción diaria de sedimento en el depósito minero (c) para el período 1980-2009.

En relación al escurrimiento superficial, se observa una alta correlación entre precipitación y escorrentía, con un evento superior a 60 mm/día. Por otra parte, el resultado de la modelación de la erosión indica que la mayoría de los eventos registran aportes de sedimento inferiores a las 8 t de material. Sin embargo, hay un número considerable de eventos que aportan hasta 16 t y en particular, para el caso del evento ocurrido el 27 de diciembre de 1981, se estima que el depósito generó más de 50 t, las cuales fueron descargadas al río.

Tal como se muestra en la Tabla 1, para el período modelado el depósito generó en promedio 37 t de sedimento/año, registrándose un máximo de 147 t el año 1981 y un mínimo de 1 t el año 1983. Dada la correlación entre la cantidad de agua caída en 24 horas y la producción de sedimento (Figura 3), se determinó una relación funcional entre ambas variables. La función se ajustó optimizando la eficiencia del modelo EM calculada de acuerdo a Nash y Sutcliffe [7]. La función de potencia presentada en la Figura 3 permite estimar preliminarmente la cantidad de sedimento aportado al río en función de la precipitación en 24 horas.

Tabla 1: Principales resultados de la modelación de la erosión anual en el depósito minero. Los resultados corresponden a la simulación de 30 años.

	Precipitación (mm/año)	Escurrimiento		Producción de sedimento (t/año)
		Por precipitación (mm/año)	Por derretimiento (mm/año)	
Promedio	300	224	7	37
Desviación estándar	152	139	19	29
Coeficiente de variación	0,5	0,6	2,9	0,8
Máximo	627	516	97	143
Mínimo	45	10	0	1

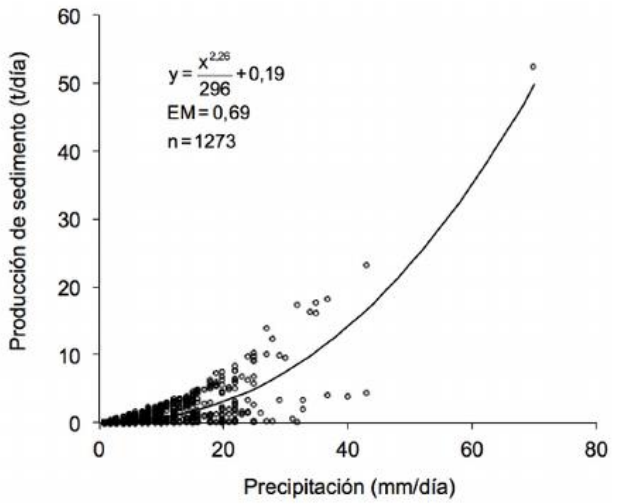

Figura 3: Relación entre la precipitación diaria y la producción de sedimento en el depósito minero.

La información presentada anteriormente corresponde a un filtro vegetacional de 30 m de largo, condición actual del humedal. El resultado del análisis de sensibilidad sobre el largo del filtro se presenta en la Figura 4. Se observa un marcado efecto para largos inferiores a 20 m y muy poco efecto con largos superiores a 40 m. Los resultados muestran que si el largo del filtro se reduce a la mitad de su condición actual, la producción de sedimento aumentaría en un 66%. En el caso de no existir vegetación, la producción de sedimento aumentaría en un orden de magnitud. Por el contrario, se necesitaría aumentar a 100 m el largo del filtro para reducir a un tercio la producción actual de sedimento.

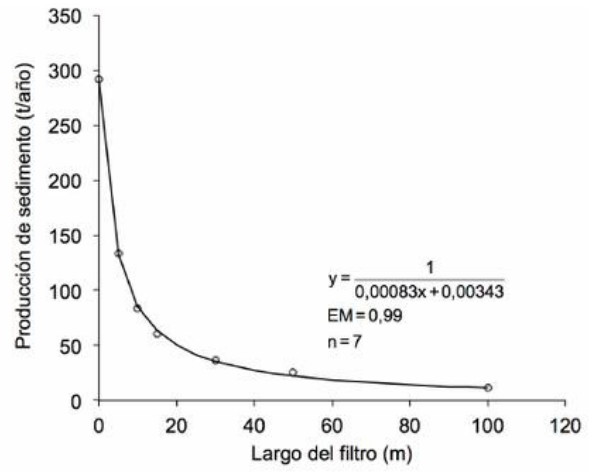

Figura 4: Resultado del análisis de sensibilidad sobre el largo del filtro vegetacional y su efecto en la producción de sedimento.

CONCLUSIONES

El resultado de la modelación biofísica de la erosión en el depósito de material de la azufrera de Aguas Calientes permite estimar que en la mayoría de los eventos modelados se registran aportes de sedimento inferiores a las 8 t en 24 horas. A escala anual, se estima un aporte promedio igual a 37 t/año. No obstante lo anterior, el régimen de precipitaciones en el lugar permite encontrar eventos de magnitud considerable, como el del 27 de diciembre de 1981, donde se estima que el depósito generó más de 50 t.

En relación a los efectos del humedal a los pies del depósito minero, el resultado del análisis de sensibilidad muestra dos condiciones. La primera para largos inferiores a 20 m, con una alta respuesta en la producción de sedimento en función del largo del filtro. La segunda es para largos superiores a 40 m, con una escasa respuesta en la reducción de los aportes de sedimentos frente a un aumento en el largo del filtro. De acuerdo a esto, en su condición actual el filtro permite reducir la entrega de sedimentos al río casi en un orden de magnitud en comparación a la condición sin filtro. De ahí la relevancia ambiental de mantener el humedal en su condición actual o mejor, si se trata de cautelar la calidad de las aguas del río.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

La condición de erosión/sedimentación en cada uno de los nodos computacionales en la ladera se calcula mediante la ecuación de continuidad en estado estacionario:

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \qquad (1)$$

Donde G es la carga de sedimento en el reguero, x es la distancia ladera abajo, D_f es la tasa de erosión o sedimentación en el reguero y D_i es la entrega de sedimento desde el área entre regueros. El valor de D_i se calcula con una serie de relaciones físicas en función de la condición del suelo. D_f se calcula como una tasa de erosión cuando el esfuerzo hidráulico de corte (τ_f) es mayor que el esfuerzo de corte crítico del material (τ_c) y cuando G es menor que la capacidad de transporte, T_c. Para ello se emplea la siguiente relación:

$$D_f = D_c\left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \qquad (2)$$

Donde D_c es la capacidad del flujo para desprender partículas en el reguero. El desprendimiento en el reguero se considera cero cuando $\tau_f < \tau_c$.

D_f se calcula como una tasa de sedimentación en el reguero cuando $G > \tau_c$:

$$D_f = \frac{\beta \cdot V_f}{q}(T_c - G) \qquad (3)$$

Donde V_f es la velocidad efectiva de sedimentación, q es descarga por unidad de ancho y β es el coeficiente de turbulencia inducida por las gotas de lluvia.

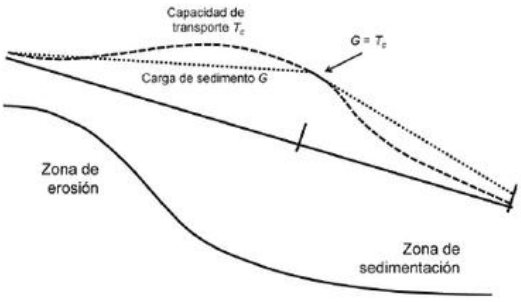

Figura 5. Idealización de una ladera mostrando la zona de sedimentación causada por la disminución de la capacidad de transporte (línea segmentada) por debajo de la carga de sedimentos (línea punteada). Adaptado de ref. [8].

GLOSARIO

Filtro Vegetacional: Cubierta vegetal permanente adyacente a un cuerpo o curso de agua, utilizada para remover contaminantes del escurrimiento superficial.

Esfuerzo de Corte Crítico: Esfuerzo de corte necesario para iniciar el movimiento de las partículas de suelo.

Capacidad de Transporte: Cantidad máxima de material que puede llevar en suspensión un curso de agua.

Carga de Sedimentos: Cantidad de material que transporta en suspensión un curso de agua.

Erosión entre Regueros: Pérdida de suelo provocada por la fuerza de impacto de las gotas de lluvia y el flujo laminar del agua entre los regueros.

Erosión en Regueros: Pérdida de suelo provocada por el flujo de agua en las paredes y fondo de los regueros.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló con el apoyo del proyecto INNOVA-CORFO, 09CN14-5709, 2010-2012, Plan de Mejoramiento y Protección de Recursos Hídricos en el Valle del Río Lluta: Conocimiento Avanzado y Tecnología para la Mitigación, Remediación Ambiental, y Gestión de la Contaminación Hídrica en el Río Azufre.

REFERENCIAS

1. Addis, M.C., Simmons, I.G., Smart, P.L. The environmental impact of an opencast operation in the Forest of Dean, England. Journal of Environmental Management 19(1):79-95, 1984.

2. Hancock, G.R., Grabham, M.K., Martin, P., Evans, K.G., Bollhofer, A. A methodology for the assessment of rehabilitation success of post mining landscapes-sediment and radionuclide transport at the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia, Science of the Total Environment 354(2–3):103-119, 2006.

3. Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., Finkner, S.C. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 32(5): 1587-1593, 1989.

4. Wu, J.Q., Dun, S., Rhee, H., Liu, X., Elliot, W.J., Golnar, T., Frankenberger, J.R., Flanagan, D.C., Conrad, P.W., Mcnearny, R.L. Applying WEPP technologies to western alkaline surface coal mines. (En: Proceedings of the International Symposium on Erosion and Landscape Evolution (ISELE). ISELE Paper No. 11086. September 18-21, 2011. Anchorage, AK). American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011.

5. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Anuario de la Minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile, 2011, 208 p.

6. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Determinación de la Erosión Potencial y actual del Territorio de Chile. Santiago, Chile, 2010, 285 p.

7. Nash, J. E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3): 282-290, 1970.

8. Flanagan, D.C., Nearing M.A. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 43(3): 573-583, 2000.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Daniela Cabrera
2 Profesor Carlos Bonilla

1

2