

DIAGNOSTICO Y REHABILITACION DE BOFEDALES AFECTADOS POR PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

Oswaldo Aduvire 1, 2 y Hugo Aduvire 3

Profesor de la Sección Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

email: eaduvirep@pucp.pe

PhD Consultor Principal del Area de Geoambiente. SRK Consulting Peru S.A.

email: oaduvire@srk.com.pe

3. PhD Superintendente Corporativo de Asuntos Ambientales. Minera Santa Luisa S.A.

email: haduvire@santa-luisa.com

RESUMEN

Los bofedales así como la mayoría de los ecosistemas altoandinos están sometidos a presiones antrópicas y/o naturales, la rehabilitación de estos ecosistemas ecológicos suele ser costosa especialmente cuando se requieren obras de ingeniería. Estas actuaciones representan un alto nivel de riesgo ya que hay que garantizar la implantación de formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto del entorno.

En el presente trabajo se presenta los trabajos de rehabilitación y recuperación de áreas que fueron afectadas por descargas de antiguas labores mineras y aportes naturales debido a la presencia de vetas mineralizadas de sulfuros y de carbón que afloran hasta superficie. Para emprender los trabajos de rehabilitación se realizó un diagnóstico detallado del sitio (características climáticas, geológicas, hidrológicas, caracterización y determinación de la calidad del suelo, descripción detallada de las características ecológicas, florísticas y agrostológicas del bofedal afectado). Así como, el contenido de materia orgánica que proviene de restos vegetales (raíces, hojas, etc) organismos y microorganismos propios de bofedal, que se encuentran en proceso de descomposición, con alto contenido de carbono.

Con la información recogida se propone las acciones de mejora y recuperación que van desde trabajos de ingeniería para preparar superficies estables y lograr espacios y condiciones de zonas húmedas compuestas por isletas o bloques colocados en forma de cojines y constituidos por formaciones de vegetación propiamente de bofedal y su soporte edáfico formado por turba y materia orgánica, circundadas por canales perimetrales y de interior que mantenían los niveles de inundación en la áreas rehabilitadas, para alcanzar la integridad biológica e hidrológica y la estabilidad del sistema del bofedal recuperado.

Palabras clave: Rehabilitación de bofedales – Pasivos ambientales mineros

DIAGNOSIS AND REHABILITATION OF MANIFESTS AFFECTED BY MINING ENVIRONMENTAL WASTE

ABSTRACT

The wetlands as well as most of the high Andean ecosystems are subject to anthropic and / or natural pressures, the rehabilitation of these ecological ecosystems is usually expensive, especially when engineering works are required. These actions represent a high level of risk since it is necessary to guarantee the implantation of plant formations that are established in an edaphic environment, mainly organic, characterized by a permanent water saturation condition, presenting a great biological diversity with respect to the environment.

This paper presents the rehabilitation and recovery works of areas that were affected by discharges from old mining works and natural contributions due to the presence of mineralized veins of sulfides and coal that outcrop to the surface. To undertake the rehabilitation work, a detailed diagnosis of the site was carried out (climatic, geological, hydrological characteristics, characterization and determination of the quality of the soil, detailed description of the ecological, floristic and agrostological characteristics of the affected wetland). As well as, the content of organic matter that comes from plant remains (roots, leaves, etc.), organisms and microorganisms typical of wetlands, which are in the process of decomposition, with high carbon content.

With the information collected, improvement and recovery actions are proposed, ranging from engineering work to preparing stable surfaces and achieving spaces and conditions of humid areas composed of islets or blocks placed in the shape of cushions and constituted by vegetation formations properly of wetland and its edaphic support formed by peat and organic matter, surrounded by perimeter and interior channels that maintained the flood levels in the rehabilitated areas, to achieve the biological and hydrological integrity and the stability of the recovered wetland system.

Keywords: Wetland rehabilitation - Mining environmental liabilities

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, los bofedales abarcan aproximadamente cerca del 2% del territorio Altoandino y se utilizan principalmente para el pastoreo de rebaños domésticos de alpacas, llamas y ovejas, que a menudo constituyen la base de las economías campesinas. Estos ecosistemas son altamente productivos para el desarrollo humano, aportando beneficios ecosistémicos que constituyen patrimonio de la nación. Los bofedales son considerados ecosistemas frágiles; por lo cual, el estado peruano a través del ministerio del ambiente ha establecido normas para asegurar la conservación entre ellas: Ley 26839 (Art. 3), Ley 28245 (Art. 3); Decreto Supremo 008 – 2005 (Art. 6.6); Ley 28611 (Art. 99.2); Decreto Legislativo 1013 (Art. 3.1), Ley 29338 (Art. 1) y Decreto Supremo N° 004-2015-MINAM (Estrategia Nacional de Humedales).

Los bofedales o turberas según la Ley General del Ambiente son ecosistemas frágiles que aportan gran variedad de servicios ecosistémicos a nivel socioeconómico-cultural y ecológico, tienen especial importancia en el almacenamiento de carbono, retención y tratamiento natural del agua, mantenimiento de la diversidad biológica, constituyen en muchos casos el hábitat de especies endémicas, aseguran la estabilidad del suelo y tienen un gran valor forrajero al albergar especies hidrofíticas que resultan palatables para el ganado y la fauna silvestre.

1. OBJETIVO

Recuperar la funcionalidad ecológica y los ecosistemas de zonas afectadas de un bofedal que recibió descargas de la excavación de una antigua labor minera.

2. DIAGNOSTICO INICIAL DEL BOFEDAL

Para describir el estado de conservación o afección del bofedal se ha recurrido al empleo de una serie de técnicas para realizar una caracterización de la flora y vegetación considerando la condición actual y la tendencia, también se ha evaluado las características edáficas e hidrológicas de las zonas húmedas, con el fin de identificar y delimitar de las áreas afectadas. De igual

forma se ha identificado las fuentes generadoras de la degradación del bofedal.

a. Identificación de fuentes de afección o contaminación

En la parte alta del bofedal había acumulación de desmonte generado en la excavación de la antigua labor minera (Pasivo Ambiental Minero-PAM) que drenaba un efluente ácido, por lo que se realizó su evaluación geoquímica.

Para la caracterización geoquímica del Desmonte se han tomado muestras en campo y luego sometido a ensayos de laboratorio como ABA (Acid-base accounting) que estima la cantidad de ácido que podría generar o consumir la muestra por oxidación total del material, cuyo resultado es interpretado mediante la aplicación de criterios como el Potencial Neto de Neutralización (NNP) y la Razón de Potencial Neto (NPR), ver Tabla 1. También se han realizado ensayos NAG (Generación Neta de Acidez) se basa en la oxidación acelerada de los sulfuros en presencia de peróxido, cuyos resultados se muestran en la Figura 1. La solución generada en el Test NAG opcionalmente es analizada por ICP-MS para determinar los potenciales solutos (metales) liberados en condiciones oxidantes.

Tabla 1. Criterio para estimar el potencial de generación de acidez según el Potencial Neto de Neutralización y Razón de Potencial Neto.

| POTENCIAL GENERADOR DE ACIDEZ | INCIERTO | NO GENERADOR DE ACIDEZ |
|-------------------------------|-----------------|------------------------|
| NNP < -20 | -20 < NNP < +20 | NNP < +20 |
| NP/AP < 1 | 1 < NP/AP < 3 | NP/AP ≥ 3 |

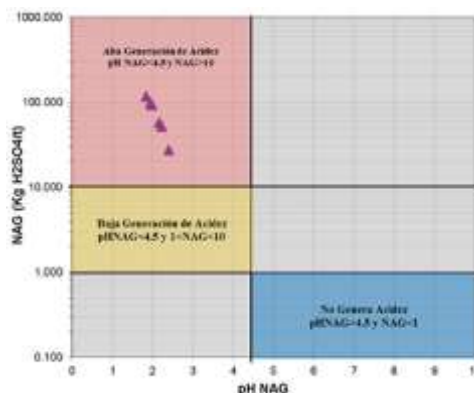


Figura 1. Criterio NAG para indicar el potencial de generación acida de los Desmontes que conforman el PAM.

Según la caracterización geoquímica del Desmonte de Mina que conformaba el PAM tiene potencial de generar drenajes ácidos. Además, en la zona se han identificados superficies desnudas en talud rocoso en donde afloran pequeñas vetillas de mineralización de sulfuros y carbón.

En época húmeda se produce la acumulación de un pequeño cuerpo de agua (Foto 1) entre el pie de la acumulación de desmonte y la parte superior del bofedal, en la caracterización del agua mediante medición con multiparámetro (pH, redox, CE, OD y TDS) esta agua tiene un pH de 4 y termina discurriendo aguas abajo atravesando el bofedal, lo que ha generado la degradación de determinadas zonas en donde prácticamente ha desaparecido la vegetación y las características edáficas e hidrológicas de las zonas húmedas (Foto 2).

Foto 1. Talud rocoso, desmonte de mina y acumulación de agua en la parte alta o cabecera del bofedal.



Foto2. Areas degradadas por discurrir del agua ácida a través del bofedal.



b. Caracterización de la Vegetación

Para determinar las **Características Florísticas y de Vegetación**, se utilizó el método denominado “Puntos en Parcela Lineal Permanente” recomendado por la USDA - Forest Service (Parker, 1951). Este método consistió en instalar dentro de la asociación vegetal que conforman los bofedales, áreas de referencia representadas por transectas en líneas rectas de 30 m, siguiendo un orden definido respecto a la orientación y los puntos fijos, como se observa en el esquema de la Figura 2. A lo largo de cada parcela lineal establecida sobre una cinta métrica extendida, se realizaron censos de vegetación de un total de 100 lecturas con un anillo censador de aproximadamente 2 cm de diámetro, cuyos contactos con una especie de pasto, suelo desnudo (D), roca (R), mantillo (M), musgo (L) y pavimento de erosión (P) se anotaron cada 0.3 m, a partir del punto cero.

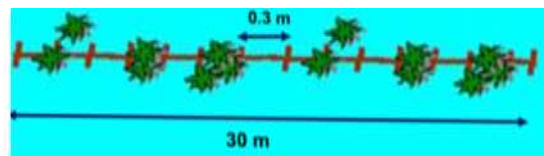


Figura 2. Parcela lineal permanente para el censo de vegetación

La **Condición Actual del Bofedal** se ha determinado en relación a su máximo potencial productivo en las mejores condiciones de manejo, para ello, se utilizaron los datos de los censos de vegetación, para clasificar las plantas de acuerdo a su deseabilidad; además, se determinó la cobertura del suelo y el vigor de las plantas. Con esta información se hizo la clasificación de la condición ecológica del bofedal, mediante cuatro índices: especies decrecientes, forraje, desnudez del suelo y vigor; ya que estos permitieron medir las características cualitativas y cuantitativas del bofedal, utilizando el método propuesto por el Programa de Forrajes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, en las Tablas 2, 3 y 4 se puede ver las escalas de valoración para determinar los índices de valoración de la condición ecológica del bofedal.

Con esta valoración se ha delimitado las áreas con condiciones de pastizal en condición pobre y muy pobre como zona a rehabilitar dentro del bofedal.

Tabla 2. Índice de especies y forrajero

| Índice de especies (ED) | | Índice forrajero (IF) | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Especies decrecientes (%) | Puntaje (0.5 valor por) | Índice forrajero (%) | Puntaje (0.2 valor por) |
| 70 a 100 | 35.0 – | 90 a 100 | 18.0 – 20.0 |
| 40 a 69 | 20.0 – 34.5 | 70 a 89 | 14.0 – 17.8 |
| 25 a 39 | 12.5 – 19.5 | 50 a 69 | 10.0 – 13.8 |
| 10 a 24 | 5.0 – 12.0 | 40 a 49 | 8.0 – 9.8 |
| 0 a 9 | 0.0 – 4.5 | Menos de 40 | 0.0 – 7.8 |

Tabla 3. Índice de desnudez del suelo y vigor

| Índice de desnudez del suelo (ID) | | Índice de Vigor (IV) | |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Índice ID – R – P (%) | Puntaje (0.2 valor por) | Índice de Vigor (%) | Puntaje (0.1 valor por punto) |
| 10 a 0 | 18.0 – | 80 a 100 | 8.0 – 10.0 |
| 30 a 11 | 14.0 – 17.8 | 60 a 79 | 6.0 – 7.9 |
| 50 a 31 | 10.0 – 13.8 | 40 a 59 | 4.0 – 5.9 |
| 60 a 51 | 8.0 – 9.8 | 20 a 39 | 2.0 – 3.9 |
| Mayor de 60 | 0.0 – 7.8 | Menos de 20 | 0.0 – 1.0 |

Tabla 4. Escala resultante para evaluar la condición del bofedal

| Evaluación de la condición del pastizal (puntaje acumulativo de ED, IF, ID y IV) | |
|--|-----------------------|
| Puntaje total | Condición de pastizal |
| 81 a 100 | Excelente |
| 61 a 80 | Bueno |
| 41 a 60 | Regular |
| 21 a 40 | Pobre |
| 0 a 20 | Muy pobre |

En cuanto a la **Tendencia del Bofedal** que mide la condición del pastizal y tiene el propósito de determinar la dirección del cambio de la condición del mismo. La tendencia se clasifica en tres categorías negativa (-), positivo (+) y estable (0). Una tendencia descendente o negativa (-) en la condición se caracteriza por un incremento de la erosión del suelo, la ausencia de plantas de forrajes de alta deseabilidad y decremento del mantillo en el suelo.

Para determinar la tendencia del bofedal, se utilizaron criterios propios de la vegetación o plantas, correspondiente a la presencia de plantas jóvenes, hojarasca o mantillo en el suelo y vigor de las plantas claves. Para ello se utilizó el Método de Transectas Lineales Permanente de Parker (1951), de las que cada unidad se encuentra dividida cada 0.3 m.

En la Tabla 5 se presenta una guía simple para determinar la condición y tendencia del pastizal (Flores, 1992).

Tabla 5. Guía para Determinar la Tendencia de los Pastizales

| | |
|--|-----------|
| 1. Presencia de plántulas o plantas jóvenes | ¿Sí o no? |
| 2. ¿Existe hojarasca o mantillo en el suelo? | ¿Sí o no? |
| 3. Erosión laminar y cárcavas. ¿Existen plantas en pedestal? | ¿Sí o no? |
| 4. Consideraciones de vigor de las plantas | |
| <ul style="list-style-type: none"> ○ Número de cabezas florales ○ Altura de plantas ○ Cantidad y longitud de hojas ○ Longitud de los rizomas y estolones | ¿Sí o no? |
| ¿Están las plantas vigorosas? | |
| 5. Composición del pastizal | |
| ¿Existe una variedad de especies de plantas perennes? | ¿Sí o no? |
| ¿Las malezas están por debajo del 20%? | ¿Sí o no? |

c. Características edáficas del suelo

Las características de los suelos que conforman el bofedal se realizaron empleando criterios y técnicas metodológicas

establecidos en el Soil Survey (revisión, 1993) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA). En campo se verificó en un sitio representativo a través de la apertura de una calicata, en donde se ha realizado la evaluación y descripción del perfil del suelo, por medio de sus capas u horizontes genéticos; además, se hizo una descripción de las características externas del suelo, evaluándose la pendiente, relieve, erosión, vegetación, altitud y pedregosidad superficial.

d. Determinación del estado de conservación.

Para conocer el estado de conservación de los ecosistemas de bofedal, se utilizó el método conocido como el esquema de las 5S para la conservación de sitios (The Nature Conservancy, 2005). Esta metodología está basada en la determinación de los sistemas (primera S "Systems"), que en este caso será cubierto con la determinación de las especies vegetales y de fauna, comunidades o asociaciones que representan la biodiversidad del área (estos aspectos estarán cubiertos con las evaluaciones ya mencionadas arriba). Luego se determina las Presiones (la segunda S "stresses), identificando los tipos de

destrucción o degradación que afectan los ecosistemas e intervienen en la reducción de su viabilidad. Posteriormente se determinan las fuentes de presión (sources of stress) que pueden ser por causas naturales o antrópicas. Finalmente se establece las medidas de control (measures of success) y/o recomendaciones que con lleven al mantenimiento o mejoramiento de la salud de la biodiversidad del bofedal y su entorno.

3. DELIMITACION DE AREAS A REHABILITAR EN EL BOFEDAL

Con los resultados obtenidos en el diagnóstico se han identificado dos zonas bien diferenciadas a rehabilitar en el bofedal, una zona relacionada al cuerpo de agua y su entorno ubicado en la cabecera del bofedal (Fig. 2), la otra zona afectada es la franja por donde discurren las aguas con acidez y que atraviesan todo el bofedal (Fig. 3), esta zona se ha delimitado para realizar un replantamiento de vegetación tipo totorilla principalmente.

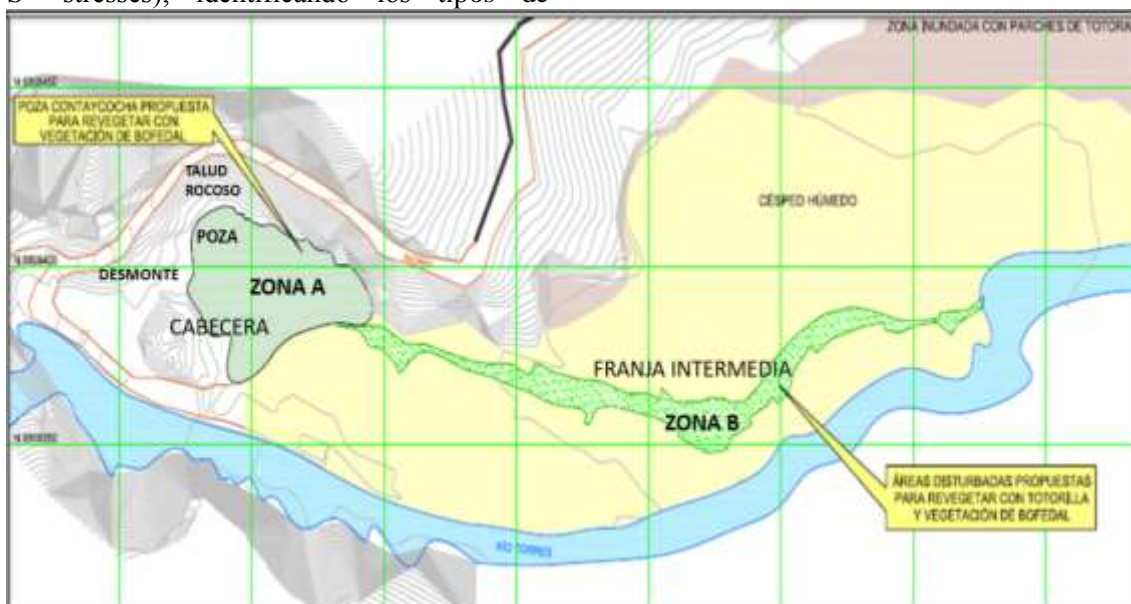


Figura 3. Delimitación de las áreas afectadas en el bofedal: Zona A cabecera con acumulación de agua y Zona B franja de escurrimiento del drenaje en franja intermedia.

4. PROPUESTAS PARA LA REMEDIACION DEL BOFEDAL

4.1. Eliminación de la fuentes de contaminación por aportes ácidos

El desmante acumulado en el PAM se ha retirado y trasladado a un depósito de desmontes para su aseguramiento y estabilización geoquímica. El espacio que ocupaba el desmante se ha rehabilitado colocando una cobertura que evita el ingreso de oxígeno y soporta la vegetación.

La zona de taludes casi verticales expuestos en roca con presencia de vetillas de mineral y carbón será cubierta con una cobertura compuesta con geoceldas rellenas con suelo orgánico y vegetación, tal como se puede ver en la Foto 3.

Foto 3. Talud rocoso en proceso de coberturado con geoceldas y vegetación



4.2. Rehabilitación en zonas afectas en el interior del Bofedal

Hay zonas del bofedal afectado que presentan condiciones disminuidas y con necesidad alta de rehabilitación o restauración, para ello, se hace una descripción de las características principales de las zonas a rehabilitar y se procede a identificar el lugar de donde se extraerá los materiales con los que realizar la recuperación, en este caso se elige aprovechar los suelos (materiales edáficos y turba) y vegetación de la zona de desbroce de la ampliación del depósito de relaves.

a. Zona A Cabecera del Bofedal

En esta zona hay dos actuaciones principales, una es el cuerpo de agua o poza en donde primero hay que evacuar el agua y hacer rellenos con material calizo que va contrarrestar la acidez del agua en caso de inundarse, sobre la que se ha colocado una capa de arcilla (20 – 30 cm) para evitar el ingreso de oxígeno desde superficie, sobre la capa de arcilla se coloca la capa de turba

(20 – 40 cm) además de ser una capa nivelante va a soportar las champas con vegetación hasta conseguir una superficie uniforme con el resto del bofedal.

Una vez alcanzada la estabilidad de la zona de la poza se procede a colocar las champas en toda el área delimitada como Zona A para rehabilitar en la cabecera del bofedal, para mantener las zonas húmedas se va a formar una red hídrica de canales (primarios, secundario y de tercer orden), tal como se ilustra en las Figuras 4 y 5. El área total a revegetar en la Zona A ocupa una superficie aproximada de 2664 m² (0.26 ha).

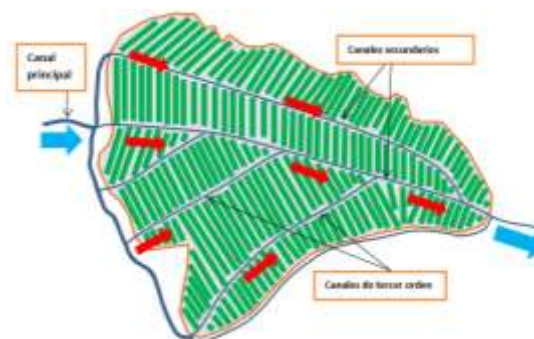


Figura 4. Red de canales para mantener inundada el área a rehabilitación mediante el colocado de los bloques de vegetación (Champas) de tamaños de 40 cm x 40 cm.

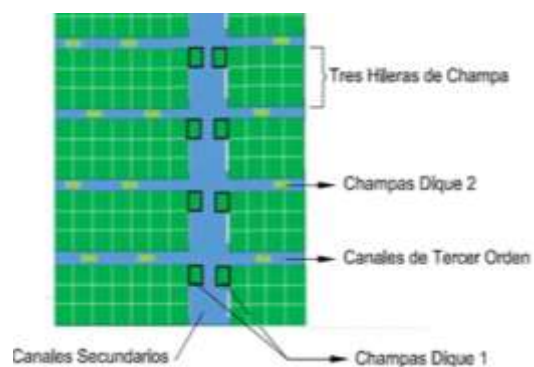


Figura 5. Disposición de la vegetación y del sistema de riego o inundación mediante colocado de champas en los canales

b. Zona B Franja Intermedia impactada por escurrimiento del drenaje

Para la franja intermedia de escurrimiento del drenaje que ha experimentado mayor pérdida de suelo se ha considerado colocar vegetación tipo totorilla (*Scirpus californicus*) y estará permanentemente inundada, tal como se puede ver en la Foto 4 que corresponde a una zona repoblada con totorilla. La superficie a revegetar

en la Zona B ocupa un área de 2269 m² (0.22 ha).

Foto 4. Franja intermedia del Bofedal rehabilitada con totorilla.



5. RESULTADOS

Para evaluar los resultados se ha considerado actividades de monitoreo con una vigilancia minuciosa durante los dos primeros meses de concluidos los trabajos de rehabilitación a fin de observar la sobrevivencia de la vegetación trasladada (champas) y condiciones de los canales principales, de segundo y tercer orden. Con estos monitoreos se pretende conocer el progreso y comportamiento de las zonas restauradas en el tiempo.

5.1. Evaluación de resultados en Zona A del Bofedal

a. Evaluación de la vegetación

La evaluación de la vegetación en las zonas rehabilitadas del bofedal se realizó por el método de Puntos de Intercepción, ampliamente utilizado para determinar la estructura y composición de una unidad de vegetación, que está basada en la posibilidad de registrar las plantas presentes o ausentes sobre un punto del suelo (Mateucci & Colma, 1982).

Esta técnica consiste en registrar las intersecciones de las especies de plantas (ramas, tallos, hojas, flores) con una varilla delgada colocada en forma vertical a lo largo de una cinta métrica de 20 m, cada 50 cm (Mateucci y Colma, 1982; Mostacedo y Fredericksen, 2000).

Para recoger datos cuantitativos como el porcentaje de cobertura (o frecuencia) de cada especie, se ha utilizado la siguiente fórmula:

$Cob(x) = (N^{\circ} \text{ de toques en } x / \text{total de toques}) * 100$; donde x = estrato

La diversidad vegetal registrada en la zona rehabilitada del bofedal se presenta en Tabla 6, en donde se aprecia que en algunos puntos evaluados las especies conforman aproximadamente el 70% de la cobertura y/o

índice de frecuencia, siendo el *Plantago tubulosa* y *Juncus stipulatus* las especie más representativas.

Tabla 6. Diversidad vegetal registrada en zonas rehabilitadas del bofedal.

| Especies | M-01 | M-02 |
|-------------------------------------|------|------|
| <i>Carex sp.1</i> | | 2.5 |
| <i>Deyeuxia cf. rigescens</i> | 10 | 10 |
| <i>Deyeuxia sp.1</i> | | 2.5 |
| <i>Hypochaeris cf. taraxacoides</i> | | 5 |
| <i>Hypochaeris sp.1</i> | | 10 |
| <i>Juncus stipulatus</i> | 37.5 | 10 |
| <i>Lachemilla diplophilla</i> | | 10 |
| <i>Lachemilla orbiculata</i> | | 5 |
| <i>Lachemilla pinnata</i> | 7.5 | 7.5 |
| <i>Lilaea scilloides</i> | 5 | 2.5 |
| <i>Lilaeopsis macloviana</i> | | 5 |
| <i>Oritophium limnophilum</i> | | 7.5 |
| <i>Plantago tubulosa</i> | | 12.5 |
| <i>Poa cf perligulata</i> | 2.5 | |
| <i>Scirpus californicus</i> | 2.5 | |
| <i>Trifolium sp</i> | | 2.5 |
| <i>Werneria apiculata</i> | | 7.5 |

b. Retención de materia orgánica y humedad en el suelo

Considerando la importancia de la materia orgánica en los bofedales, se han tomado muestras cuyos resultados de los análisis dan valores altos de materia orgánica entre 47% y 65% (Tabla 7). Respecto al porcentaje de carbono en los bloques de bofedal (champas) están por cerca al 38% y en canales de agua entre 10 a 12%, lo que permitirá la estabilización de estos nuevos sistemas restaurados.

Tabla 7. Materia orgánica y contenido de carbono en zonas rehabilitadas del bofedal

| Puntos de Evaluación | M.O | Carbono |
|----------------------|-------|---------|
| | % | % |
| Muestra 1 | 47.72 | 27.68 |
| Muestra 2 | 65.93 | 38.24 |
| Canal Secundario | 22.07 | 12.8 |

La **retención de humedad del suelo** en zonas rehabilitadas en general alcanza más del 70% de su peso corresponde a agua almacenada entre los elementos de su composición, especialmente en la materia orgánica.

5.2. Evaluación de resultados en Zona B del Bofedal

La revegetación en la franja intermedia del Bofedal (Zona B) con totorilla (*Scirpus californicus*) presenta buena cobertura y colonización (ver foto 5), lo cual está potenciado principalmente por la presencia permanente de agua; incluso, pese a haberse identificado algunos signos de corte de la parte vegetativa de las plántulas producto del pastoreo de ganado de la zona; la totorilla presenta buen aspecto, incluso desarrollaron espigas (órganos de reproducción y formación de semilla); estas características son indicadores de éxito.

Foto 5. Zona revegetada con totorilla incorporada completamente a la vegetación del entorno



5.3. Evaluación de las condiciones del Bofedal en función a sus atributos

Para evaluar las condiciones de conservación de las zonas rehabilitadas se ha realizado mediciones en base a tres atributos: Integridad biótica, Función hidrológica y Estabilidad del sistema, según la Tabla 8 (Calvo, 2016).

Introduciendo los datos medidos se han obtenido los resultados recogidos en la Tabla 9, en donde las zonas rehabilitadas del Bofedal presentan buen estado de conservación y salud (Foto 6).

Tabla 8. Rangos de valores para medir la salud de un ecosistema

| Atributos | Indicadores | Unidades | Muy bueno | Buen estado | Moderado | Baja | Muy baja | |
|-------------------------|---------------------------|----------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Integridad Biótica | Materia Orgánica | (%) | >80 | 60 - 80 | 40 - 59 | 20 - 39 | <20 | |
| | Carbono | (%) | >46 | 34 - 46 | 22 - 33 | 10 - 21 | <10 | |
| Función Hidrológica | Calidad del Agua | pH | und | >7.5 | 6.35 - 7.5 | 5.2 - 6.4 | 4 - 5.1 | <4 |
| | | CE | μS/seg | >152.9 | 111 - 152.9 | 69.8 - 110 | 28.2 - 69.7 | <28.2 |
| | Densidad aparente | (g/cm ³) | <0.09 | 0.10 - 0.42 | 0.43 - 0.72 | 0.73 - 1.03 | >1.03 | |
| Estabilidad del Sistema | Cobertura | (%) | >95 | 83 - 95 | 71 - 82 | 60 - 70 | <60 | |
| | Signos de erosión | (%) | <5 | 5 a 15 | 16 - 25 | 26 - 35 | >35 | |
| | Plantas invasoras | (%) | <10 | 10 a 20 | 21 - 34 | 35 - 50 | >50 | |
| | Fragmentación del hábitat | (%) | <3 | 3 a 7 | 7 a 11 | 11 a 15 | >15 | |
| | Diversidad de especies | (%) | >2.17 | 1.59 - 2.17 | 0.99 - 1.58 | 0.38 - 0.98 | <0.38 | |

Tabla 9. Condición de zonas rehabilitadas en base a sus atributos de integridad biótica, función hidrológica y estabilidad.

| Atributos | Indicadores | Unidades | Zonas Rehabilitadas del Bofedal | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | Valor | Calificación | |
| Integridad Biótica | Materia Orgánica | (%) | 65.93 | Buen estado | |
| | Carbono | (%) | 38.24 | Buen estado | |
| Función Hidrológica | Calidad del Agua | pH | und | 6.9 | Buen estado |
| | | CE | μS/seg | 560 | Muy buen estado |
| | Densidad aparente | (g/cm ³) | 0.07 | Muy buen estado | |
| Estabilidad del Sistema | Cobertura | (%) | 100 | Muy buen estado | |
| | Signos de erosión | (%) | 0 | Muy buen estado | |
| | Plantas invasoras | (%) | 0 | Muy buen estado | |
| | Fragmentación del hábitat | (%) | 0 | Muy buen estado | |
| | Diversidad de especies | (%) | 2.58 | Muy buen estado | |

El grado de cobertura está positivamente correlacionado con el grado de protección que brinda la vegetación contra el potencial erosivo

de la lluvia cuando ésta impacta directamente sobre el suelo. Este parámetro está correlacionado con los patrones de flujo de agua, porque a mayor área con cobertura, la intercepción de gotas de lluvia es mayor y el movimiento del agua superficial se hace más lento.

Foto 6. Condiciones de conservación en el bofedal rehabilitado.



6. CONCLUSIONES

En general, sobre las condiciones del bofedal rehabilitado se puede indicar lo siguiente:

- Integridad biótica: más del 70% de la biomasa disponible está compuesta por especies nativas deseables con abundante mantillo y hojarasca que se mantiene en el tiempo sobre la superficie del suelo. El mantillo es abundante y las especies claves están presentes.
- Función hidrológica: la lluvia penetra el perfil del suelo con facilidad durante la época lluviosa en bofedales temporales; el agua aflora en la superficie gran parte del año en la temporada seca.
- Estabilidad del sistema: la diversidad de plantas es alta y la cobertura uniforme, la presencia de plantas invasoras es escasa, hay pocos signos de erosión, no se observan signos de fragmentación, y la conectividad entre unidades de vegetación presentes es alta.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ACMER 2000. Management of Sulfidic Mine Wastes and Acid Drainage, Australian Center for Mining Environmental Research, September.
Aduvire, O., Escribano, M., García-Bermúdez, P., López-Jimeno, C., Mataix, C. y Vaquero, I. 2006. Manual de Construcción y Restauración de Escombreras. Ed. ETSIM-UPM. 633pp. ISBN: 84-96140-20-2.

Bienes R. y Marqués M.J. 2006. Conservación del Medio Ambiente, revegetación, recuperación del suelo, y empleo de residuos en el control de la erosión. IMAP. Madrid, España.

Calvo V. 2016. Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales de alta montaña. Tesis. UNALM. Lima. 110p.

Crooks K. R. y M. Sanjayan. 2006. Connectivity Conservation. Conservation Biology Book Series, Cambridge University Press. Cambridge.

CHERRY, J. 2011. Ecología de los sistemas de humedales: agua, sustrato y vida (en línea). Natural education knowledge 3 (10): 16. Consultado 10 ene. 2015. Disponible en www.nature.com

Domínguez, E. y D. Vega-Valdés (eds.) 2015. Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes. Colección de libros INIA N° 33. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike. Punta Arenas, Chile. 334 pp.

Flores, E. R. 1992. Manejo y Evaluación de Pastizales. Proyecto TTA. Hoja de análisis de la tendencia del pastizal.

Havstad, K.M., Peters, D.P.C., Skaggs, R., Brown, J., Bestelmeyer, B. Fredrickson, E., Herrick, J., & Wright, J. 2007. Ecological services to and from rangelands of the United States. Ecological Economics, 64, 261–268.

Larson WE., Pierce F.J. 1994. The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. In. Doran, JW., Coleman DC., Bezdicsek, DF, Teward BA. (eds). Defining soil Quality for a sustainable environment. Madison, WI. Soil Sci. Soc. m. 35, 37-52 (special publication).

León A. 2016. Reserva de carbono en bofedal y su relación con la florística y condición del pastizal. Tesis. UNALM. Lima. 91p.

León H. 2017. Estudio de evaluación del estado de conservación de los ecosistemas de la cuenca alta del río Cañete. MINAM.

Matteucci S. y Colma A. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaria General de la organización de los Estados Americanos Programa Regional de desarrollo científico y tecnológico. Washington DC.

Mostacedo, B. y Fredericksen, T. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz, Bolivia.

Parker K.W. 1951. A method for measuring trend and range condition on National Forest Ranges. USDA. Forest Service.

PNUMA (Programa de las naciones unidas para el desarrollo). 2010. Manejo integrado de agua y áreas costeras (en línea). Consultado 5 ene. 2015. Disponible en

www.pnuma.org/aguamiac/pdf.

Price, W.A., 2009. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Program. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories. British Columbia, Canada. 579 pp.

Sobek, A.A., W.A. Schuller, J.R. Freeman and R.M. Smith, 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Report EPA-600/2-78-054, US National Technical Information Report PB-280.

The Nature Conservancy 2005. Planificación para la conservación de áreas. Desarrollo de estrategias, ejecución de acciones y medidas de

éxitos en cualquier escala. Descripción de las mejores prácticas.

Usher B.H., Cruywagen L.M., De Necker E., Hodgson F.D. 2003. Acid-Base Accounting, Techniques and Evaluation (ABATE). South African Water Research Commission. Report Number 1055/2/03.

Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., y Alfaya, V., eds. 2011. Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas. Fundación Biodiversidad, Madrid, España. ©Fundación Biodiversidad.

Walder, I., Twardowska, I., Wahlstrom and Tommi Kaartinen, T. (2010). European Waste Characterisation Standards Acid/neutral Rock Drainage Prevention. Preliminar Europea (PREn15875) test BAB.

Artículo recibido en: 28.03.2021

Artículo aceptado: 23.04.2021

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 6 (1): 27 – 33, Junio 2021. ISSN 2519-5352

UNA APROXIMACIÓN TERMODINAMICA PARA LA COMPRESION DE LA ECONOMIA CIRCULAR APLICADA AL ÁMBITO MINERO - METALÚRGICO

M. Ing. José Miguel Huerta¹
PhD. Romina Cayumil Montecino¹
Dr. Ing. Mario Sánchez Medina¹

¹Universidad Nacional Andrés Bello, Chile. Carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia
e.mail: jose.huerta@unab.cl

Resumen

La Economía Circular es un concepto económico vinculado al desarrollo sustentable y a la economía verde, pero que la profundiza mucho más. Apunta no sólo a reducir el impacto ambiental de las industrias y la disminución de la cantidad de desechos generados, sino que a producir bienes y servicios mediante el manejo sostenible de materiales y fuentes de energía. Consideramos que este enfoque que está basado en la observación del comportamiento de los mercados y que puede ser enriquecido con aspectos teóricos provenientes de la Termodinámica. Para ello, proponemos la inclusión de algunos conceptos como la Energía Libre de Gibbs y la irreversibilidad de los procesos, creemos que agregar ideas permite enfatizar el profundo vínculo que es posible establecer entre la Economía Circular y la Termodinámica. El objetivo del trabajo es investigar el modo en que las definiciones Termodinámicas permiten ampliar la mirada sobre los flujos relacionados con la Economía Circular. Se exponen casos del ámbito minero metalúrgico que son brevemente comentados con esta nueva aproximación. Se concluye presentando los conceptos de la Termodinámica como una ampliación de los aspectos teóricos del enfoque Económico Circular.

Palabras Clave: Economía Circular, Termodinámica, Procesos Minero-Metalúrgicos

A THERMODYNAMIC APPROACH TO UNDERSTAND THE CIRCULAR ECONOMY APPLIED TO THE MINING - METALLURGICAL FIELD

Abstract

The Circular Economy is an economic concept linked to sustainable development and the green economy, but it goes much deeper into it. It aims not only to reduce the environmental impact of industries and reduce the amount of waste generated, but also to produce goods and services through the sustainable management of