

Análisis Económico para la Recuperación de las Aguas Residuales de un Proceso Minero

Investigación

M.C. Miguel Escamilla López, Dr. Jorge Meza Jiménez, M.A. Ricardo Llamas Cabello, C.P. María Sánchez Losoya
Instituto Tecnológico de Colima, Departamento de Ingeniería Industrial
Avenida Tecnológica No.1, C.P. 28976 Villa de Álvarez, Colima. Tel/Fax (312) 3129920 y 3126393 Ext. 244
melitc2000@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo muestra el análisis económico realizado en un proyecto para la recuperación del agua residual de un proceso minero, en una mina de mineral de hierro a cielo abierto ubicada al norte del estado de Colima, ya que durante la época de estiaje no es posible cumplir con el programa de producción establecido, debido a la escasez de agua fresca de pozo que se extrae de los mantos freáticos de la zona de donde se abastece el proceso; el agua residual a recuperar no contiene reactivos químicos, sólo sólidos en suspensión que una vez sedimentados generan agua totalmente limpia 100% reutilizable de nuevo en el proceso. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad económica del proyecto, ya que los indicadores establecen un valor presente neto de 2'053,982 usd (dólares americanos), una tasa interna de retorno de la inversión del 58.33% y un periodo de recuperación de 2 años y 6 meses.

Palabras clave: Jales, presa de jales, sistema de bombeo, concentrado de mineral de hierro, agua fresca, agua de proceso.

Abstract

This paper shows an economic analysis carried out for a residual water of mining process recovery project, in an iron ore opencast mine located at northern of Colima state, because during the dry season is not possible to meet the production schedule established, due to fresh water lack from a well which is extracted from groundwater area that supply the process; residual water to recovery don't contains chemical reagents, suspended solids only once sedimented completely, generate clean water again 100% reusable in the process. The obtain results show the economic viability of this project, because the indicators establish a present net value of 2'053,982 usd, an internal recovery rate of 58.33% and a recovery period of 2 years and 6 months.

Key words: Tailings, tailings pound, pumping system, iron ore concentrated, fresh water, process water.

Introducción

El agua es el principal elemento de y para los seres vivos; cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre, se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 96.5%, los glaciares y casquetes polares poseen el 1.74%, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1.72% y el restante 0.04% se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos. Solamente el 3% de esa agua es agua dulce; de la cual el 80% está formando los polos y zonas heladas de la tierra, el 19% es agua subterránea, el 0.7% está formando parte de la atmósfera, mientras que el agua dulce disponible en ríos y lagos es apenas el 0.3% del total. Es una cantidad escasa para toda la humanidad, por lo que es necesario conservarla y evitar su contaminación, si queremos que la vida continúe sobre nuestro planeta [1].

Se estima que a nivel mundial el 70% del agua dulce es usada para la agricultura, el 20% para la industria y el 10% para el consumo doméstico. El acceso al agua potable se ha incrementado durante las últimas décadas en la superficie terrestre; sin embargo, estudios de la FAO (Food and Agriculture Organization), estiman que uno de cada cinco países en vías de desarrollo tendrá problemas de escasez de agua antes del año 2030, en esos países es vital un menor gasto de agua en la agricultura modernizando sus sistemas de riego [2].

En México, el 77% del agua potable se usa para la agricultura y la ganadería (alrededor de 6.3 millones de hectáreas son de riego), luego está el consumo municipal y doméstico con el 13% y la industria al final, con el 10%; se estima que aproximadamente el 40% de esta agua se desperdicia debido a riego ineficiente, fugas y malos hábitos de consumo [3].

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas, un país con escasez de agua es aquel que cuenta con menos de 1,000m³ disponibles por habitante por año, ya que esto no es suficiente para proporcionar una adecuada alimentación o para respaldar el progreso económico y es además, una causa potencial de severos daños ambientales. Los países con 1,000m³ a 1,700m³ por habitante por año se dice que tienen dificultades hídricas; México se encuentra dentro de este grupo, sin embargo el valle de México se cataloga con escasez de agua, al registrar menos de 900m³ por habitante por año [4].

Debido a lo anterior, es urgente la necesidad de generar proyectos para el ahorro de agua potable y la reutilización de las aguas residuales tanto domésticas como industriales; el presente trabajo se orienta precisamente sobre esta alternativa.

Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios); comúnmente suelen clasificarse como aguas residuales municipales, que son residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal y aguas residuales industriales, que son las aguas provenientes de las descargas de industrias de manufactura y de servicios [5].

Proceso de producción. El mineral explotado por la empresa es la “magnetita” (Fe₃O₄) o mineral de hierro, caracterizado por su fuerte magnetismo, su color negro y su dureza; el producto semiterminado es el concentrado de mineral de hierro en forma de lodo y el producto final es el pelet de mineral de hierro en forma de pequeñas esferas. Básicamente el proceso de producción se divide en tres etapas: extracción, molienda y concentración, así como peletizado; los primeros dos (mina a cielo abierto y plantas de molienda y concentración) se encuentran en el municipio de Minatitlán, mientras que el tercero (plantas peletizadoras) se localizan en el municipio y puerto de Manzanillo. La presente investigación se orienta específicamente sobre la evaluación económica de un proyecto para la recuperación de las aguas residuales conocidas como “jales”, descargadas por las plantas de molienda y concentración hacia su depósito final conocido como presa de jales [6].

Etapas de molienda y concentración. El proceso de molienda y concentración es un proceso 100% húmedo a base de agua y sin la adición de reactivos químicos; el mineral de hierro triturado ingresa a la fase de molienda a través de bandas transportadoras, donde se muele en molinos autógenos hasta alcanzar cierto tamaño de partícula, tal que le permita pasar a la

etapa de concentración, donde por medio de tambores magnéticos se separa el mineral de hierro de los “jales” o residuos. El concentrado de mineral de hierro en forma de lodo se envía hacia las plantas peletizadoras ubicadas en Manzanillo, a través de un ferrocarril de 46 km. de longitud; mientras que los “jales” o residuos de las plantas también en forma de lodo, se descargan en la presa de jales, donde se depositan y sedimentan [6].

Para lograr una adecuada molienda y concentración del mineral y obtener un concentrado de mineral de hierro de calidad, es necesario un gran volumen de agua; para esto la empresa cuenta con un sistema de extracción de agua fresca de pozo compuesta por 5 bombas con motores de 100 hp cada una; el agua extraída por estas pasa a una estación de rebombeo integrada por 5 bombas de trasiego con motores de 600 hp cada una, las cuales la envían hacia una cisterna de donde se abastecen las plantas de molienda y concentración [7].

Debido a la demanda de agua del proceso de molienda y concentración, por lo general operan 4 de las 5 bombas de pozo y 4 de las 5 bombas de trasiego durante aproximadamente 7,884 horas al año, que representa el 90% de utilización de las plantas de molienda y concentración y en promedio este sistema extrae 730m³/h (metros cúbicos por hora) de agua de los mantos freáticos de la región, lo cual castiga el nivel freático; ya que en la temporada de estiaje durante los meses de Marzo, Abril, Mayo y Junio, aunque operen las 5 bombas de pozo, no es suficiente para abastecer el proceso, generando bajas capacidades de operación por la falta de agua y en consecuencia el incumplimiento del programa de producción de concentrado de mineral de hierro [7].

Estadísticas operativas de los últimos 4 años señalan que se dejan de producir alrededor de 120,000 toneladas de concentrado de mineral de hierro al año por falta de agua; lo cual a su vez representa dejar de producir 116,400 toneladas de pelet de mineral de hierro [8].

Fundamentos teóricos

La ingeniería económica o análisis económico en la ingeniería, es un conjunto de técnicas para tomar decisiones de índole económico en el ámbito industrial, considerando siempre el valor del dinero a través del tiempo; algunos conceptos importantes utilizados en el presente trabajo, son los siguientes.

Interés. Es la evidencia del valor del dinero en el tiempo; es una medida del incremento entre la suma originalmente prestada o invertida y la cantidad final debida o acumulada [9].

Inversión inicial. Comprende la adquisición de todos los activos fijos y diferidos necesarios para iniciar la operación del proyecto [10].

Inflación. Es el incremento sostenido del nivel general de los precios en una economía dada [10].

Depreciación y amortización. Es el proceso contable para representar la distribución adecuada del costo del activo, entre los periodos contables en los que será utilizado [11].

Valor de rescate. Es el valor de mercado de un activo en cualquier momento de su vida útil [12].

Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR). Es la tasa de referencia sobre la cual basarse para hacer las inversiones; si no se obtiene cuando menos esa tasa de rendimiento, se rechazará la inversión, se define como[10]:

$$TMAR = i + f + if \quad (1)$$

Donde: i = Premio al riesgo establecido por la empresa.
 f = Inflación promedio para el horizonte de evaluación.

Valor presente neto (VPN). Significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente; un valor presente neto de cualquier cantidad, puede calcularse con la fórmula [12]:

$$VPN = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Donde: FNE_n = Flujo neto de efectivo del año n .
 P = Inversión inicial en el año cero.
 i = Tasa de referencia que corresponde a la TMAR.

Tasa interna de rendimiento (TIR). Es la tasa de descuento que hace que la suma de los flujos descontados (valor presente neto), sea igual a la inversión inicial; en otras palabras, es la tasa de descuento que hace que VPN sea igual a cero[12].

$$P = \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (3)$$

O bien:

$$VPN = 0 = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (4)$$

Donde: FNE_n = Flujo neto de efectivo del año n .
 P = Inversión inicial en el año cero.
 i = Tasa interna de rendimiento a determinar (TIR).
 VPN = Valor presente neto de la inversión.

Periodo de recuperación de la inversión (PR). Es el número de años que tomará el proyecto para recuperar la inversión inicial [12].

Materiales y métodos

Como primer paso se realizó un análisis sobre el flujo de agua fresca, agua de proceso y agua residual en las plantas de molienda y concentración a capacidad normal, en la figura 1 se muestra el balance actual de consumo de agua en m³/h; se observa que en promedio las plantas necesitan alrededor de 11,000m³/h totales de agua para poder cumplir con el programa de producción, de los cuales 9,534m³/h son agua permanente de proceso, 33m³/h son pérdidas por fugas, evaporación y derrames del proceso, 250m³/h se envían a las plantas peletizadoras junto con el concentrado de mineral de hierro y 450m³/h se descargan en la presa de jales junto con los “jales” o residuos de este proceso, donde por sedimentación se depositan en el fondo de la presa y por rebose el agua totalmente limpia libre de sólidos se incorpora al afluente del Río Marabasco.

El proyecto en análisis es la recuperación de buena parte de este volumen de agua limpia para su reincorporación al proceso de molienda y concentración, mediante la instalación de un nuevo sistema de bombeo en el área de la presa de jales.

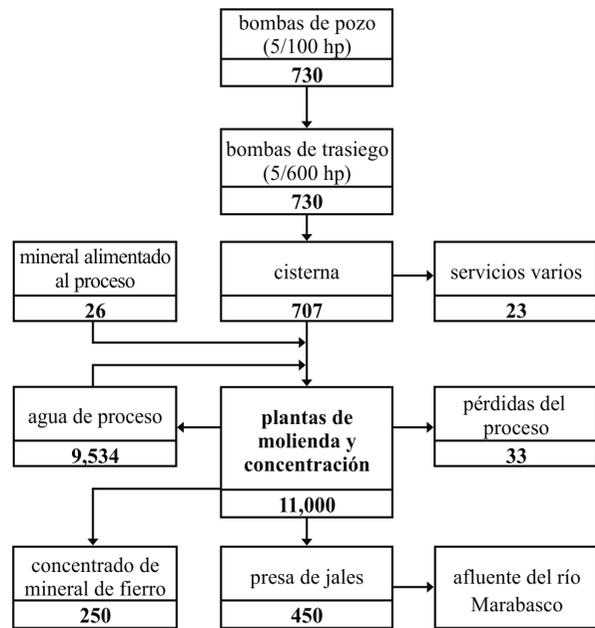


Figura 1. Balance actual de consumo de agua (m³/h) del proceso de molienda y concentración.

Como segundo paso se realizaron mediciones sobre las pérdidas de agua que se tienen en la presa de jales y el volumen factible de recuperar, la figura 2 muestra el balance proyectado de consumo de agua con el proyecto propuesto; como se puede observar, se espera recuperar 350m³/h] de los 450 m³/h descargados en la presa (77.78%) y retornarlos nuevamente a las plantas de molienda y concentración, ya que las mediciones

realizadas señalan que existen pérdidas permanentes estimadas en 80m³/h, debido a filtración, evaporación y derrames en la presa, así como fugas de 20m³/h por manejo durante el proceso de captación. Este volumen de agua sustituirá al volumen correspondiente de agua fresca de pozo que actualmente se extrae de los mantos freáticos de la zona, con lo cual el volumen a extraer ahora será de 380m³/h y no de 730m³/h.

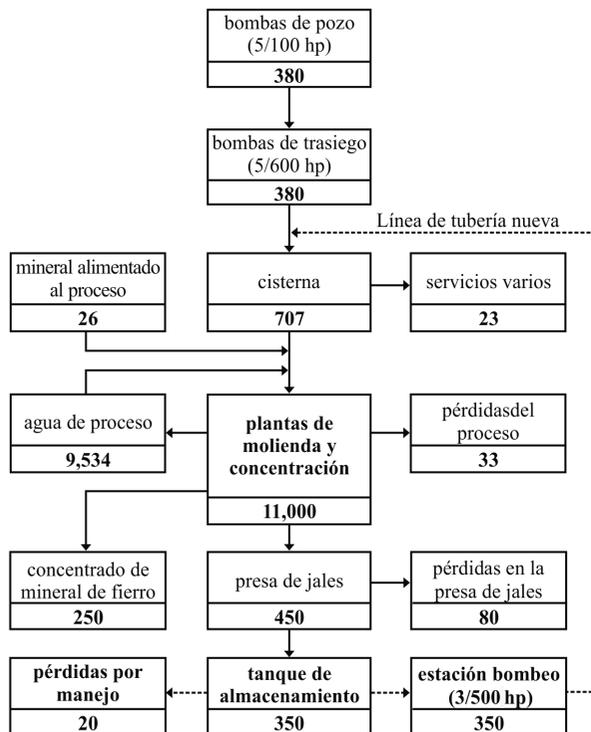


Figura 2. Balance proyectado de consumo de agua (m³/h) del proceso de molienda y concentración con el proyecto de recuperación de agua en operación.

El tercer paso consistió en la conceptualización del proyecto; es decir, determinar toda la infraestructura necesaria para este y su correspondiente inversión. De esta forma, el nuevo sistema de bombeo a instalar en la presa de jales para recuperar 350m³/h de agua totalmente limpia y retornarlos a las plantas de molienda y concentración para su reutilización, consiste de lo siguiente:

- Canal de captación.
- Tanque de almacenamiento.
- 3 bombas con motores de 500 hp cada uno.
- Caseta de protección para bombas y motores.
- Subestación eléctrica.
- Sistema de alumbrado.
- Línea de tubería de acero 1,150m de longitud con soportes de concreto.

Este nuevo sistema de bombeo funcionará en promedio 7,884 horas al año con 2 de las 3 bombas instaladas, las cuales sustituirán a 2 bombas de pozo y 2 bombas de trasiego actuales y será operado por un operador de bombas por turno; por lo cual serán necesarios 4 operadores de bombas. En la tabla 1 se muestra un resumen de la inversión necesaria en cuanto a activos fijo y diferido para el proyecto, incluyendo el costo de la mano de obra.

Por otra parte, las políticas de la empresa para la evaluación económica de los proyectos internos, cuando se realizó el presente trabajo (Agosto a Noviembre de 2011), fueron las siguientes [13]:

- Flujo de efectivo en dólares estadounidenses (usd) a una tasa de cambio de \$12.45 por usd.
- Costo de 0.5502usd/m³ de agua fresca de pozo.
- 7,884 horas de operación al año de la plantas de molienda y concentración.
- Proyección del flujo de efectivo a 5 años.
- Inflación del 2.5% anual.
- Premio al riesgo del 18% anual.
- Depreciación anual de activos mecánico y eléctrico 20%, civil 5% y diferido 10%.

CONCEPTO	COSTO (u.s.d.)
Obra civil	518,544
Obra mecánica	908,032
Obra eléctrica	452,679
Activo diferido	229,423
TOTAL	2,108,678

Tabla 1. Inversión necesaria incluyendo mano de obra.

Financiamiento de la inversión. Los accionistas de la empresa compran la producción total de pelet de mineral de hierro que se produce, para transformarlo en lámina, planchón, varilla, alambón, perfiles y otros productos en sus acerías; el precio que pagan por tonelada de pelet varía continuamente, ya que es igual a su costo de producción, más un dólar adicional para financiar los proyectos internos de la empresa; de esta forma se dispondrá del efectivo suficiente para financiar el monto total de la inversión que requiere el proyecto, sin un interés de por medio que pagar.

Beneficios. El cuarto paso consistió en estimar los beneficios más importantes que se esperan de este proyecto, de los que se obtendrá un ahorro significativo en dinero, los cuales son tres:

Beneficio 1 (menos agua fresca de pozo). Este es el beneficio más significativo del proyecto; ya que se dejarán de extraer 350m³/h de agua fresca de pozo de los mantos freáticos de la zona durante 7,884 horas de operación al año, el ahorro esperado es:

$$(350\text{m}^3/\text{h}) \times (7,884 \text{ h}) = 2'759,400 \text{ m}^3/\text{año} \quad (5)$$

A un costo de 0.5502usd/m³, el ahorro anual es:

$$(2'759,400 \text{ m}^3/\text{año}) \times (0.5502 \text{ usd}/\text{m}^3) = 1'518,222\text{usd} \quad (6)$$

Beneficio 2 (menor operación de bombas de pozo y de trasiego). Se dejarán de operar 2 bombas de pozo y 2 bombas de trasiego durante 7,884 horas al año, por lo cual se tendrán ahorros en consumo de energía eléctrica y mantenimiento, estimados en **447,772 usd** al año.

Beneficio 3 (eliminación de bajas capacidades de operación por falta de agua en la época de estiaje).

La eliminación de las bajas capacidades por falta de agua, traerá como beneficio el cumplimiento del programa de producción de concentrado de mineral de fierro, recuperando la producción de 120,000 toneladas al año que se perdía por esta causa; aquí el beneficio es la producción de 116,400 toneladas de pelet y su respectiva venta, lo cual generará la misma cantidad en dinero (**116,400 usd**), debido al dólar adicional por tonelada de pelet que aportan los socios para el financiamiento de proyectos internos. El resumen del beneficio anual que se espera del proyecto se muestra en la tabla 2.

CONCEPTO	AHORRO (usd)
Agua fresca de pozo	1,518,222
Operación de 4 bombas	447,772
Producción de concentrado	116,400
TOTAL	2,082,394

Tabla 2. Beneficio anual esperado con el proyecto.

Costos de operación y mantenimiento. El quinto paso consistió en la estimación de los costos de operación y mantenimiento que tendrá el proyecto; en la tabla 3 se muestra el costo anual por concepto de depreciación y amortización de los activos fijo y diferido, de acuerdo a las políticas de la empresa y en la tabla 4 se muestra un resumen de los costos anuales de operación y mantenimiento que tendrá el nuevo sistema de bombeo de agua en la presa de jales.

ACTIVO	COSTO (usd)	DEP. ANUAL (%)	(usd)
Obra civil	518,544	5	25,927
Obra mecánica	908,032	20	181,606
Obra eléctrica	452,679	20	90,536
Activo diferido	229,423	10	22,942
TOTAL		100	321,011

Tabla 3. Costo anual de depreciación y amortización.

Ahorro anual esperado del proyecto. El sexto paso consistió en estimar el ahorro anual del proyecto; el cual se obtiene al restar el costo anual de operación y mantenimiento del beneficio anual, el cual será el flujo de efectivo anual neto del proyecto; el ahorro anual esperado en el año cero es:

$$2'082,394 \text{ usd} - 821,661 \text{ usd} = 1'260,733 \text{ usd} \quad (7)$$

CONCEPTO	COSTO (usd)
Energía eléctrica	324,780
Mano de obra (4 operadores)	19,784
Depreciación y amortización	321,011
Mantenimiento	156,086
TOTAL	821,661

Tabla 4. Costo anual de operación y mantenimiento.

Valor de rescate. De acuerdo a la depreciación anual de los activos, el valor de rescate del proyecto en el año cinco sin considerar la inflación se muestra en la tabla 5. Considerando una inflación anual del 2.5%, este valor inflacionado en el año cinco es:

$$V.R. = (503,620) \times (1.025)^5 = 569,799 \text{ usd.} \quad (8)$$

ACTIVO	DEP. ANUAL (usd)	VALOR DE RESCATE (usd)
Obra civil	25,927	388,908
Obra mecánica	181,606	0
Obra eléctrica	90,536	0
Activo diferido	22,942	114,712
TOTAL	321,012	503,620

Tabla 5. Valor de rescate del proyecto.

TMAR. Así mismo, con base a una prima de riesgo del 18% anual establecida por la empresa, la tasa mínima atractiva de retorno de la inversión (TMAR) para este proyecto es:

$$TMAR = 0.025 + 0.18 + (0.025 \times 0.18) = 20.95\% \quad (9)$$

Resultados y discusión

El flujo de efectivo (ahorros anuales netos) del proyecto en usd inflacionados a una tasa del 2.5% anual proyectado a 5 años, se muestra en la figura 3.

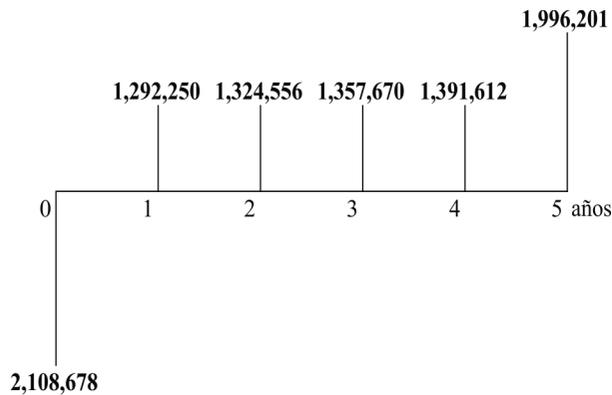


Figura 3. Flujo de efectivo final del proyecto.

De acuerdo al flujo de efectivo mostrado en la figura 3, los indicadores económicos para el proyecto de recuperación de las aguas residuales del proceso de molienda y concentración, son:

Valor presente neto (VPN) = **2'053,982usd.**
 Tasa interna de rendimiento (TIR) = **58.33 %**
 Periodo de recuperación (PR) = **2 años y 6 meses**

Desde el punto de vista económico, el proyecto es totalmente viable; ya que su valor presente neto es con mucho positivo, su tasa interna de rendimiento es superior en 37.38 puntos porcentuales, a la TMAR (tasa mínima atractiva de rendimiento) determinada y la inversión se recuperará en un lapso probable de 2 años y 6 meses.

Desde el punto de vista operacional, este proyecto ayudará a abatir las bajas capacidades de producción en la temporada de estiaje, con lo cual será posible cumplir los programas anuales de producción de concentrado y pelet de mineral de hierro y además, hará factibles futuros incrementos de capacidad en la producción que se prevean a corto plazo.

Conclusiones

Es importante destacar que proyectos de este tipo como el analizado en el presente trabajo, son urgentes en todos los sectores de la sociedad; ya que ayudan a la conservación de los recursos naturales tan necesaria hoy en día, en beneficio del medio ambiente y la comunidad en general. También por que su impacto va mas allá de las fronteras de la empresa y son bien vistos por las autoridades gubernamentales de todos los niveles, quienes brindarán mayores facilidades y apoyos para su realización.

En este caso y dejando de lado el aspecto económico, la principal aportación del presente proyecto, es su contribución a la conservación de los recursos acuíferos del municipio de Minatitlán, Colima, en beneficio de

la población y el medio ambiente de la región; ya que dejar de extraer 350m³/h de agua fresca de pozo al ritmo de producción de la empresa, representa dejar de extraer 2'759,400 m³ anuales de los mantos freáticos, lo cual seguramente tendrá un impacto inmediato en el ecosistema de la región.

Finalmente, se concluye que este proyecto es totalmente viable desde cualquier punto de vista, ya sea económico, ambiental, social o político, debido a que sus beneficios no solo impactan al interior de la empresa, si no que permean al exterior de esta, en beneficio del medio ambiente, la comunidad y los ecosistemas del área de influencia.

Referencias

- [1] (Earth's water distribution, Water Science for Schools, U.S. Geological Survey.
- [2] FAO (2003), No hay crisis mundial de agua, pero muchos países en vías de desarrollo tendrán que hacer frente a la escasez de recursos hídricos, www.fao.org
- [3] Comisión Nacional del Agua (CNA), Estadísticas del Agua en México 2010, Centro virtual de la información del agua, AGUA.org.mx.
- [4] El agua en México, fusda.org.
- [5] ¿Qué son las aguas residuales? (2009), cuidoelagua.org.
- [6] Escamilla, López Miguel (2000), "Optimización de las mezclas de minerales con diferentes contenidos de hierro magnético, azufre y sílice, utilizando programación lineal en la empresa
- [7] C.M.B.J. Peña Colorada, S.A. de C.V.", Tesis para la obtención del grado de Maestro en Ciencias, Villade Álvarez, Colima, México.
- [8] C.M.B.J. "Peña colorada" (2010), Manual de Operación Área Mina, Colima, México. C.M.B.J. "Peña colorada" (2007, 2008, 2009, 2010,2011), Reportes de operación Área Mina", Colima, México.
- [9] Blank, Leland T. y Tarquin, Anthony J. (1992), Ingeniería Económica, 3ª. Edición, McGraw-Hill.
- [10] Baca, Urbina Gabriel (2010), Evaluación de Proyectos, 6ª. Edición, Mc Graw Hill.
- [11] Coss, Bu Raúl (1993), Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión, 2ª. Edición, Limusa.
- [12] Baca, Urbina Gabriel (2010), Fundamentos de Ingeniería Económica, 5ª. Edición, McGraw-Hill.
- [13] C.M.B.J. "Peña colorada" (2011), Departamento de costos y finanzas, Colima, México.

Recibido: 22 de agosto de 2012

Aceptado: 11 de abril de 2013