

# Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

## Ingeniero Informático

**TEMA:** Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el  
proceso de rehabilitación minera.

**AUTOR:** Elizabeth Bichara González

**TUTORES:** Dra. Yiezenia Rosario Ferrer

Ing. Katusca Jiménez Roché

Ing. Ariel Montes de Oca Pérez

Moa, 2013

“Año 55 de la Revolución”

## **Declaración de Autoría.**

**Moa, Holguín, 17 de Junio de 2013**

**“Año del 55 Aniversario del Triunfo de la Revolución”**

Yo, Elizabeth Bichara González, estudiante del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), Dr. Antonio Núñez Jiménez, declaro que soy autora única de la presente investigación titulada: “Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de rehabilitación minera” y autorizo a hacer uso de la misma en su beneficio al ISMM.

Para que así conste firman la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes \_\_\_\_\_ del año \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Firma del autor

Elizabeth Bichara González

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor (a)

Dra. Yiezenia Rosario Ferrer.

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor (a)

Ing. Katusca Jimenez Roché

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor (a)

Ing. Ariel Montes de Oca

## *Pensamiento*

*“La vida es el constante empleo, el agradecimiento por el roce, el obstáculo, jamás la caída, a no ser victoriosa y gloriosa; la obra permanente, el ir; triunfo eterno, montaña arriba, roca adelante. La vida no tiene dolores para el que aprende a tiempo su sentido.”*

*“José Martí”*

*“In The middle of difficulty lies opportunity”*

*“Albert Einstein”*

## *Dedicado*

*Quiero dedicarla especialmente a la personita  
más importante de mi vida a la niña de mis ojos  
mi bebé Yasmil Isabella.*

## *Agradecimientos*

*Quiero agradecer a todas esas personas que estando lejos o cerca de mí me han apoyado y me han dado su amor y cariño especialmente:*

*A mis padres por ser mi vida, mi fortaleza, mi faro y haber estado conmigo dándome su apoyo incondicional y su amor eterno.*

*A mi hermana Diana y mi tío Freddy por ser las dos imágenes en las que me miro para ser cada día mejor.*

*A mis abuelos por darme su amor y sabiduría.*

*A toda mi familia que siempre me impulsan para seguir adelante a pesar de los obstáculos que suele ponernos la vida.*

*A todas mis amistades que siempre están ahí cuando las fuerzas se agotan para darte un toque de energía y esperanza.*

*A mi tutora que me ha apoyado y ha confiado en mí y que sin ella hubiese sido imposible hacer realidad este sueño.*

*A todos los profesores del instituto.*

*A una persona muy importante que me ayudó incondicionalmente: Daylin Arguelles Castillo.*

*Y sobre todas las cosas gracias a Dios por traer a mi vida a todas las personas que nombré y las que se me quedaron que saben estarán siempre en mi corazón a todos.*

*Gracias*

## **Resumen**

La industria minera es una importante fuente de obtención de riquezas en nuestro país, sin embargo trae consigo importantes daños ambientales como el deterioro de la flora y la fauna en las zonas explotadas.

Por esta razón se desarrollan métodos de rehabilitación para la recuperación de estas áreas. Específicamente en la provincia de Pinar del Río existen importantes yacimientos como “Castellano” y “Santa Lucía” los cuales no han sido recuperados.

Para la puesta en práctica de un determinado método de recuperación, es necesario realizar un estudio de los principales parámetros ambientales los cuales son numerosos y los valores que pueden tomar son variados, por lo cual el proceso de selección del método de rehabilitación más adecuado puede ser engorroso y largo, cuando se precisan de resultados inmediatos.

Con vista a agilizar este proceso de selección se ha decidido realizar un sistema experto ya que estos programas proporcionan la capacidad de trabajar con grandes cantidades de información, que son uno de los grandes problemas que enfrenta el analista humano que puede afectar negativamente a la toma de decisiones, pues este puede depurar datos que no considere relevantes, mientras un sistema experto debido a su gran velocidad de proceso analiza toda la información incluyendo las no útiles para de esta manera aportar una decisión más sólida.

## **Abstract**

The mining industry is an important source of obtaining funds in our country, yet brings significant environmental damage as the deterioration of the flora and fauna in logged areas. For this reason restoration methods are developed for the recovery of these areas. Specifically in the province of Pinar Del Rio there are important deposits like "Castellano" and "Santa Lucia" which have not been recovered.

For the implementation of a particular method of recovery, it is necessary to conduct a study of the major environmental parameters which are numerous and the values they can take are varied, making the selection process more appropriate rehabilitation method can be cumbersome and long, when you need immediate results. With a view to expedite the selection process has been decided to make an expert system as these programs provide the ability to handle large amounts of information, which are one of the great problems facing the human analyst that may adversely affect the decision-decisions because the human analyst can debug data not consider relevant, while an expert system because of its unmatched processing speed analyzes all information including useful not so provide a more solid decision.

# Índice

Introducción .....	1
Rehabilitación Minera.....	5
1.1 Rehabilitación minera.....	5
1.2 Situación de la rehabilitación minera en Cuba.....	7
1.2.1 Situación existente en la región de Santa Lucía, provincia Pinar del Río.....	8
1.3 Procedimiento para la rehabilitación minero ambiental de yacimientos piríticos-polimetálicos.....	10
1.5 Alternativas de Rehabilitación.....	11
Sistemas Expertos .....	18
2.1 ¿Qué es un Sistema Experto?.....	18
2.2 ¿Por qué desarrollar sistemas expertos?.....	20
2.3 Ventajas de los sistemas expertos.....	21
2.4 Componentes de un sistema experto.....	22
2.5 Metodologías para el desarrollo de Sistemas Expertos.....	24
Método Weiss y Kulikowski.....	25
Método BGM.....	26
Metodología IDEAL.....	27
2.6 Lenguajes para construir sistemas expertos.....	30
LISP.....	30
Prolog.....	31
Smalltalk.....	31
CLIPS.....	32
2.7 Aplicaciones de los sistemas expertos.....	32
Interpretación, diagnóstico y monitoreo.....	32
Diseño y selección.....	33
Planificación.....	33
Control.....	33
Instrucción.....	34
Desarrollo del prototipo del Sistema Experto SEMER.....	35
3.1 Características del sistema.....	35
3.2 Estudio de Viabilidad.....	38
3.3 Adquisición del conocimiento.....	40
3.4 Conceptualización.....	40
3.6 Formalización.....	45
3.7 Implementación.....	47
3.8 Pruebas del sistema.....	48
Conclusiones Generales .....	53
Recomendaciones .....	54
Bibliografía.....	55
Apéndices.....	58
Apéndice A.....	58
Apéndice B.....	65
Apéndice C.....	67

---

## **Índice de Tablas**

Tabla 1 Comparación entre Sistema Clásico y Sistema Experto. ....	21
Tabla 2 Glosario de Términos. ....	41
Tabla 3 Relación Concepto/ atributo/ valor .....	43
Tabla 4 Principales técnicas empleadas en la rehabilitación de yacimientos polimetálicos a escala internacional. ....	65

---

## **Índice de Figuras**

Figura 3.1 Diagrama de caso de uso del Sistema.....	37
Figura 3.2 Mapa de conocimientos.....	45
Figura 3.3 Arquitectura del sistema.....	48
Figura 3.4 Interfaz de Usuario.....	49
Figura 3.5 Interfaz clasificar el tipo de Área degradada.....	50
Figura 3.6 Interfaz para seleccionar tipo de explotación del yacimiento.....	50
Figura 3.7 Interfaz para determinar la calidad del agua.....	50
Figura 3.8 Interfaz para determinar los minerales predominantes en la mena.....	51
Figura 3.9 Interfaz para determinar el método de Rehabilitación Recomendado.....	51

# Introducción

La industria minera es una importante fuente de obtención de riquezas no solo en nuestro país sino también a nivel mundial. Con el desarrollo y perfeccionamiento de los diferentes métodos y herramientas, para hacer más eficiente y productiva esta actividad, han venido aparejado grandes afectaciones del medio ambiente. La revolución científica y técnica ha ido alterando el ambiente de una forma tan poderosa que ha llegado a ser amenazante para el equilibrio del planeta. Los problemas ambientales derivados de la acción antrópica han pasado a ser protagonistas de la vida social y política en estos últimos decenios.

La rehabilitación de áreas degradadas como uno de los mecanismos implementados para la solución de los problemas ocasionados por la actividad minera no ha sido marginada y muchos menos excluida en un sinnúmero de eventos y foros de relevancia a nivel mundial, catalogados en diferentes países como importantes instrumentos de política pública en el área ambiental. Los enfoques son variados, pero generalmente persiguen el objetivo común de asegurar la corrección de los impactos ambientales considerados negativos y de gran envergadura así como dar un uso final a los terrenos rehabilitados, en correspondencia a las necesidades sociales y económicas de la región.

La provincia de Pinar del Río tiene numerosos yacimientos, entre ellos, los yacimientos Castellano y Santa Lucía, que en la actualidad no cuentan con la aplicación de un proyecto de recuperación ambiental satisfactorio. Además de la actividad antrópica se hace necesario adicionar el efecto natural provocado por la existencia de afloramientos de mineralización sulfurosa en gran parte de la zona, los cuales bajo la acción de los agentes meteorizantes provocan la removilización de diversos elementos contaminantes. La situación ambiental del yacimiento Santa Lucía y su área de influencia, repercute negativamente sobre el medio ambiente del área, debido a que, durante y después de su explotación no se realizaron trabajos de rehabilitación en el mismo

Resulta evidente el deterioro del ecosistema, donde se ven afectadas variables ambientales como relieve, aguas, suelos, paisaje, fauna, flora, entre otras; lo que lleva a la búsqueda de una herramienta eficiente para darle solución a la problemática minero ambiental presente en la región de Santa Lucía, provincia Pinar del Río.

Se han desarrollado diferentes métodos para la recuperación ambiental de las zonas degradadas por la minería, sin embargo, no existe en la actualidad un procedimiento metodológico, que partiendo de los conocimientos acumulados sobre la temática, permita seleccionar de forma preventiva el más adecuado para cada tipo de explotación y en este caso se encuentran los yacimientos piríticos-polimetálicos de Pinar del Río, durante años explotados a cielo abierto y que en la actualidad constituyen pasivos ambientales mineros.

El proceso de selección del mejor método de rehabilitación minera para cada tipo de explotación se hace largo y engorroso, pues es necesario un estudio previo de los parámetros ambientales que interactúan, cada uno de los cuales pueden tomar diversos valores de acuerdo a las condiciones del yacimiento.

Ante tal situación se puede afirmar que estamos en presencia del **problema científico**: *¿Cómo mejorar la toma de decisiones en el proceso de selección del método de rehabilitación más adecuado para la recuperación de los yacimientos piríticos-polimetálicos?*

**Objeto de estudio:** *Sistemas expertos de apoyo a la toma de decisiones.*

**Campo de acción:** *Desarrollo de sistemas expertos basados en reglas de apoyo a la toma de decisiones.*

**Objetivo general:** *Desarrollar un prototipo de sistema experto basado en reglas para automatizar la selección del método de rehabilitación en la recuperación de yacimientos piríticos-polimetálicos, en la provincia Pinar del Río.*

**La idea a defender es:** *Un sistema informático basado en el conocimiento capaz de recomendar el método de rehabilitación minera más adecuado para la recuperación ambiental de yacimientos piríticos-polimetálicos, favorecerá la recuperación ambiental de las áreas afectadas por la explotación minera de este tipo de yacimientos.*

**Objetivos específicos:**

1. *Elaborar una base de conocimiento sobre los métodos de rehabilitación de yacimientos piríticos polimetálicos.*

---

## *2. Implementación del prototipo de Sistema Experto para la selección del Método de Rehabilitación.*

Para darle solución a los objetivos específicos se proponen las siguientes **tareas**

1. Elaboración de los fundamentos teóricos de la investigación.
2. Adquisición y conceptualización de los conocimientos referidos a la rehabilitación minera.
3. Formalización de los conocimientos conceptualizados.
4. Implementación del Sistema Experto para apoyar la selección de métodos de rehabilitación de yacimientos piríticos-polimetálicos.

Para dar cumplimiento a los objetivos antes propuestos se emplearon los métodos teóricos y empíricos de la investigación científica.

Entre los **métodos empíricos** se encuentran:

- **Entrevista:** Necesaria en la recopilación de la información para el conocimiento del problema en general. En esta investigación, se realizaron varias entrevistas con el experto, que radica en la Empresa Geominera de Pinar del Río, para obtener información acerca del procedimiento de rehabilitación, los criterios de selección de las técnicas y otras informaciones necesarias para el desarrollo del sistema.
- **Comparación:** Esta se utilizó en la búsqueda y solución de problemas similares, donde se pudo comparar todas las herramientas estudiadas y así definir cuál utilizar.

Entre los **métodos teóricos** se encuentran:

- **Hipotético – Deductivo:** Este método permitió realizar el debido análisis para el desarrollo de la investigación, ya que a partir de del problema planteado y la hipótesis se dedujo una solución.
- **Análisis y síntesis:** Fue empleado en la recopilación y el procesamiento de la información obtenida en los métodos empíricos y de esta forma arribar a las conclusiones.

El presente trabajo se estructura en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el capítulo 1, Rehabilitación Minera, se ofrece una visión general de la rehabilitación minera en Cuba y a nivel mundial. Se tratan aspectos esenciales como enfoques y

---

definiciones. Además se especifican las características de cada uno de los métodos de recuperación estudiados y las distintas etapas que se deben realizar para poder llevar a cabo esta vital actividad que es la rehabilitación minera.

El capítulo 2, Sistemas Expertos, se dedica a explicar los Sistemas Basados en el Conocimiento y dentro de estos, los Sistemas Expertos del cual se desarrolla un prototipo para automatizar el proceso de selección del método de rehabilitación más adecuado para la recuperación de zonas dañadas por la explotación minera.

En el capítulo3, Implementación del Sistema Experto para la Selección del Método de Rehabilitación, se describe la aplicación que se desarrolló para apoyar la selección del método de rehabilitación minera más adecuado en yacimiento piríticos-polimetálicos.

# 1

## CAPÍTULO

# Rehabilitación Minera

En este capítulo se ofrece una visión general de la rehabilitación minera en Cuba y a nivel mundial. Se tratarán aspectos esenciales como enfoques y definiciones. Además se especificarán las características de cada uno de los métodos de recuperación propuestos para la rehabilitación en los yacimientos piríticos-polimetálicos y las distintas etapas que se deben realizar para llevar a cabo esta vital actividad.

## 1.1 Rehabilitación minera.

La rehabilitación minera es la recuperación del lugar alterado por la minería de acuerdo a un proyecto previo y en condiciones compatibles con el entorno, o sea reaprovecha el área para una nueva finalidad, ya sea comercial, agrícola, industrial, urbanística, recreativa o cultural (Rubio, 1998).

La rehabilitación de las áreas degradadas por la actividad minera tanto a cielo abierto como subterráneas es relativamente joven, con una amplia aplicación de técnicas y variedades de uso para el manejo posterior de la zona. El diseño de metodologías y procedimientos que permitan la rehabilitación minera eficiente en los yacimientos explotados a cielo abierto ha sido motivo de preocupación para el hombre moderno, por ser los que más impactan al medio ambiente, por la gran extensión de terrenos que ocupa esta actividad y los impactos que se derivan de la misma.

Uno de los retos críticos para la industria minera se presenta cuando se procede al cierre de la explotación, momento en el que la comunidad local puede tener que enfrentarse a problemas económicos y ambientales.

La restauración, es el proceso de integrar en el entorno los terrenos afectados por actividades extractivas, es una de las herramientas disponibles para reducir el impacto

negativo ocasionado por la minería y abarca desde la recuperación del uso anterior de la tierra hasta la rehabilitación de la zona para dotarla de nuevos usos.

Para darle cumplimiento a este propósito se han establecido principios, modelos y metodologías, que proveen soluciones para satisfacer las necesidades de las actuales y futuras generaciones, dándole un uso adecuado a los terrenos que han sido afectados por la actividad extractiva, y lograr con ello el llamado desarrollo sostenible.

El interés internacional prestado a este tema, su vínculo con la actividad minera, así como la necesidad de implementar planes de rehabilitación minera con el objetivo de mitigar o eliminar los impactos negativos que esta ocasiona, impuso la necesidad natural de ejecutar los cierres de minas. En los países latinoamericanos es una deuda pendiente dejada por las grandes empresas transnacionales.

La recuperación de áreas degradadas ha sido implementada en diferentes países como instrumento esencial de la política pública en el área ambiental. Los enfoques son variados, pero persiguen un objetivo común: asegurar la corrección de los impactos ambientales considerados negativos e importantes (Chisholm y Dumsday, 1987).

Existen cuatro enfoques en la restauración de comunidades biológicas y ecosistemas (Bradshaw, 1990):

1. Ausencia de acción, cuando se deja a que el ecosistema se recupere por sí mismo, conocido también como restauración pasiva.
2. Rehabilitación, cuando se reemplaza un ecosistema degradado por otro que tenga un cierto tipo de productividad, utilizando poco o muchas especies.
3. Restauración parcial, consiste en restaurar por lo menos algunas de las especies dominantes originales y ciertas funciones del ecosistema. Por ejemplo, la plantación de árboles nativos en un bosque degradado.
4. Restauración completa, consiste en restablecer el área con su composición de especies estructuras y funciones originales por medio de un programa activo de modificación del sitio y de reintroducción de las especies

El entorno afectado por la actividad minera no se puede retornar a sus condiciones primitivas, por tal motivo es más factible eliminar o mitigar los impactos ambientales negativos.

Los pasivos ambientales mineros (PAM) son todas las instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras abandonados o inactivos que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

Los impactos ambientales, sociales y económicos de los PAM, no solamente dañan la imagen y la reputación de las empresas mineras sino que provocan un creciente rechazo de las comunidades para las actividades presentes y futuras. Es por ello que, aunque son considerados como un problema histórico, requieren hoy en día una solución integral para no poner en peligro todo el sector minero (Oblasser y Chaparro, 2008).

## **1.2 Situación de la rehabilitación minera en Cuba.**

En las minas lateríticas de Moa y Nicaro, en la provincia de Holguín, la actividad minera a cielo abierto ha degradado varios cientos de miles de hectáreas de terreno, muchas de las cuales se encuentran en procesos de recuperación por la intervención del hombre. La recuperación de las áreas afectadas por la actividad minera en la región de Moa, Nicaro y Mayarí, ha sido tratada en varias investigaciones. Pous (1985) propone el uso forestal del suelo, no existen otras alternativas de uso y no se tiene en cuenta las potencialidades reales del patrimonio geólogo-minero existente en el área.

Herrero y otros (2009) señalan los impactos negativos generados durante el proceso de explotación de los yacimientos lateríticos de Nicaro y Mayarí, ofrecen resultados experimentales, donde la primera opción de uso de los terrenos afectados es forestal, principalmente con la casuarina que es formador de suelo, pero esta especie forestal no posee un uso realmente industrial. No se analizan otras formas de uso de los terrenos afectados, ya que estos pueden ser utilizados para diferentes fines teniendo en cuenta la capacidad del suelo y las necesidades económicas y sociales de la región.

Urbino y otros (2011), presentan una tecnología de rehabilitación ecológica de áreas degradadas por la minería a cielo abierto para regiones de alto valor de endemismo en la biodiversidad, considerando la tecnología como un proceso que tiene como fin principal mitigar los impactos negativos de la actividad minera a cielo abierto. Sin embargo, su aplicación se limita a la región oriental del país, ya que la distribución del endemismo de la biodiversidad no se comporta de la misma manera en todas las regiones del país donde existe actividad minera.

García (2011), a partir de un diagnóstico integral de la región nororiental y del estado de la rehabilitación en la zona, identifica un gran número de deficiencias que conspiran contra el desarrollo exitoso de la recuperación. Dentro de los aspectos negativos, se encuentran que las acciones de rehabilitación no se han ejecutado inmediatamente después del proceso de minado, lo que permite un mayor desarrollo de los procesos erosivos y con ello del fondo genético en la capa vegetal. Todos estos aspectos que constituyen errores cuantificables en la recuperación, hay que tenerlos en cuenta en el momento de ejecutar la rehabilitación en las diferentes zonas extractivas.

De los trabajos para la rehabilitación en Moa y los aspectos que hay que mejorar desde el punto de vista jurídico para el cierre de minas se precisó que existen aspectos legales establecidos en la Ley 76 de Minas relacionados con el cumplimiento de las obligaciones de los concesionarios, que por diversas razones no se cumplen, y otros aspectos que no están precisados en esta ley que son necesarios instrumentar.

### **1.2.1 Situación existente en la región de Santa Lucía, provincia Pinar del Río.**

Las menas pirítico-polimetálicas del yacimiento Santa Lucía se explotaron en dos etapas; la primera comenzó en 1980-1984 y la segunda etapa desde 1994-1998, por el método de cielo abierto. En el año 2006 se reabrió el yacimiento con el objetivo de extraer la plata y el oro contenidos en el sombrero de hierro, esta operación concluyó en el 2008. Actualmente estos yacimientos piríticos-polimetálicos son considerados como PAM.

El incremento del área denudada y la falta de trabajos de recuperación minera aumentaron significativamente los problemas ambientales de la zona. En la región del yacimiento Santa Lucía, se han realizado estudios que brindan una panorámica general de la calidad ambiental de la zona. Ponce y otros (1997) predicen y evalúan los impactos ambientales de las obras mineras y metalúrgicas ubicadas en el municipio Minas de Matahambre, poblado de Santa Lucía. Abordan la problemática ambiental de forma general y salen a la luz serios problemas ambientales, pero el yacimiento Santa Lucía aún estaba en operaciones, es decir, existían daños ambientales que se acrecentaron con el cierre total temporal de esta mina.

Milián (2006) identifica y evalúa los impactos ambientales, generados por el pasivo ambiental minero Santa Lucía, obteniéndose los factores del medio más impactados por

la explotación minera. Estos son: el suelo, el agua superficial, el relieve y el paisaje; todos constituyen puntos clave en el proceso de recuperación minera.

En el marco del Proyecto de Colaboración Cuba–Brasil, Cañete y otros (2009) realizaron un estudio integral de la degradación ambiental generada por los pasivos ambientales mineros Santa Lucía y Castellanos, en el cual se constató los elevados niveles de contaminación presentes en las aguas superficiales generadas por el drenaje ácido de minas y los principales riesgos ambientales de la zona.

Los estudios realizados en la zona aportan un soporte teórico sobre los daños que provoca al medio el pasivo ambiental minero Santa Lucía. La gestión de la rehabilitación minera en estos yacimientos polimetálicos, no se ha resuelto hasta el momento. Se han realizado acciones preliminares, como el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental realizado por la entidad CESIGMA en el año 2007, el Proyecto de Colaboración Cuba-Brasil “Estudio de la Degradación Ambiental Provocada por la Minería en la Región de Santa Lucía en el occidente de Cuba” en el año 2008, el Proyecto Ramal “Identificación de Pasivos Ambientales” realizado por el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) y la Empresa Geominera de Pinar del Río en el período 2009-2010, que han sido fuentes de conocimiento para la elaboración de los planes de rehabilitación.

Una gestión de rehabilitación eficiente necesita además, de estudios de ordenamiento territorial para planificar los diferentes usos del terreno con vista a su recalificación, teniendo en cuenta sus características y que permita un desarrollo económico y social sostenible de dichas áreas.

Luego del análisis de los resultados de las investigaciones realizadas, resulta evidente el deterioro del ecosistema, donde se ven afectadas variables ambientales como el relieve, agua, suelo, paisaje, fauna, flora etc., lo que conlleva a la búsqueda de una herramienta eficiente para dar solución a la problemática minero ambiental presente en la región minera de la provincia de Pinar del Río.

### **1.3 Procedimiento para la rehabilitación minero ambiental de yacimientos piríticos-polimetálicos.**

Un estudio permitió establecer un procedimiento para la rehabilitación en los pasivos ambientales mineros y futuras explotaciones de yacimientos piríticos-polimetálicos explotados a cielo abierto (Milián, 2012). El procedimiento se estructura en etapas, las que se describen a continuación.

#### ***Etapa I. Caracterización de las áreas degradadas por la actividad minera.***

Se recopila toda la información disponible del área objeto de la investigación, se describen las características geológicas y mineras, los aspectos socioeconómicos de la región y se analiza el medio físico receptor. Se define si los yacimientos objetos de estudios constituyen pasivos ambientales mineros (PAM) o futuras explotaciones (que pueden explotarse posteriormente) a partir de la información recopilada.

Se debe realizar un estudio geoquímico de los drenajes que se encuentren en el área, el inventario de la cantidad y calidad de los residuales sólidos y líquidos que constituyan riesgos ambientales, y determinar los impactos ambientales más significativos en el área de estudio. Finalmente, realizar la caracterización de las áreas degradadas por la actividad minera. Estas se pueden clasificar como:

- Zonas de impacto intenso, las áreas cuyos puntos de muestreo poseen entre 3 y 5 especies químicas y pH inferior a 3.5.
- Zonas de impacto atenuado, aquellas que los puntos muestreados tengan 2 ó 3 especies químicas y pH mayor que 3.5

#### ***Etapa II. Selección de alternativas de rehabilitación***

Deben definirse los objetivos de la recuperación, listándolos por orden de importancia, a fin de obtener resultados satisfactorios. El objetivo fundamental debe ser proporcionar acciones que permitan minimizar o eliminar la dinámica de los procesos de degradación y dar un uso social y económicamente sostenible a los terrenos recuperados, a partir del análisis de las potencialidades reales de la zona y de los usos anteriores a la explotación. De forma general se recomienda declarar objetivos a corto, mediano y largo plazo.

En esta etapa se elabora el Plan de Recuperación que incluye los objetivos y el establecimiento de los usos futuros de los terrenos recuperados.

***Etapa III. Aprobación del plan de rehabilitación.***

Es entregado el Plan de Recuperación a la autoridad ambiental para su aprobación, en caso de no ser aprobado se retrocede a la segunda etapa donde se seleccionarán nuevas alternativas para la recuperación.

***Etapa IV. Desarrollo del plan de rehabilitación.***

En esta etapa se ejecutan todas las medidas para la recuperación de las áreas afectadas por la actividad minera, estas serán chequeadas por el responsable del plan.

***Etapa V. Monitoreo y seguimiento de la rehabilitación.***

Es la fase en que se realiza la inspección a las medidas implementadas, se analiza la efectividad o no de la tecnología aplicada en las áreas rehabilitadas. Se verifica el comportamiento de los indicadores ambientales, lo que permite analizar la implementación de medidas complementarias en caso que el plan de rehabilitación no cumpla con las expectativas.

***Etapa VI. Cierre de minas.***

Es la etapa en que la mina está totalmente recuperada y es entregada a la autoridad ambiental.

**1.5 Alternativas de Rehabilitación.**

La correcta elección de la técnica de recuperación es fundamental en la selección de las alternativas de rehabilitación. A continuación se describen las técnicas de mayor aceptación que se aplican en la rehabilitación de yacimientos piríticos-polimetálicos (Milián, 2012).

***Enmienda orgánica***

El objetivo de la aplicación de este tipo de enmienda es proporcionar niveles de materia orgánica al suelo, lo que implica un descenso de los valores de la erosión con un

aumento de la estabilidad de compuestos arcillo – húmicos del suelo al aumentar la cohesión de los residuos mineros.

Por otro lado, la adición de carbonatos, zeolitas, fosfatos, minerales de hierro, bentonitas, hidróxido cálcico, compost o levaduras, también ha sido empleada a la hora de inmovilizar y reducir la biodisponibilidad de metales tóxicos como el plomo (Pb), uranio (U), arsénico (As), cinc (Zn), níquel (Ni), estroncio (Sr), cobre (Cu) y cadmio (Cd).

### **Neutralización de aguas ácidas**

Método recomendado para neutralizar la acidez de las aguas contaminadas provenientes de los drenajes de minas.

La utilización del óxido de cal ( $\text{CaO(s)}$ ) en los procesos de neutralización se basa en el hecho comprobado, que al poner en contacto  $\text{CaO(s)}$  con el agua se forma una mezcla sólida-líquida, llamada “lechada de cal”, que tiene propiedades neutralizantes. De esta forma se pueden neutralizar ácidos y aunque la reacción suele ser lenta, tiene la ventaja del bajo costo de adquisición, sobre todo para las instalaciones que tratan volúmenes pequeños y medianos. Además, el reactivo es fácil de manejar y es eficiente en un amplio rango de concentración de material soluble, facilita la co-precipitación de metales de forma que las solubilidades al pH de precipitación suelen ser mayores que los valores correspondientes a la precipitación individual del metal.

### **Tratamientos Pasivos**

Se basan en la construcción de sistemas destinados a potenciar los procesos químicos y biológicos naturales, por lo que no requieren la adición continua de agentes químicos o energía.

- **Canales Carbonatados Abiertos (Open Limestone Channels, OLC'S):** Este tratamiento consiste en canales de conducción del agua superficial cuyo cauce está recubierto de una capa carbonatada destinada a producir una ligera alcalinidad y a eliminar parte del hierro (Fe) disuelto. Generalmente estos canales se emplazan en zonas de elevadas pendientes (más del 20%), ya que la acción abrasiva del agua moviéndose a gran velocidad tiende a destruir las cubiertas pasivadoras de oxidróxidos de hierro en torno a los granos carbonatados. Estos canales se emplean generalmente como método de pre

tratamiento de aguas ácidas con concentraciones no muy elevadas de Hierro (Fe) o Aluminio (Al).

- **Sistemas de Producción Sucesiva de Alcalinidad (Successive Alkalinity Producing Systems, SAPS):** Este sistema de tratamiento combina las características de los drenajes anóxicos carbonatados y los humedales anaerobios. Su diseño es igual al de un humedal anaerobio pero además incluye un sistema de drenaje en el interior de la capa de carbonato para asegurar que el agua a tratar mantenga contacto directo tanto con la capa carbonatada como con la capa orgánica. El agua almacenada en la balsa atraviesa primero la capa vegetal, donde son retenidos algunos metales, seguidamente la capa aeróbica de materia orgánica, donde las bacterias aeróbicas eliminan el oxígeno, posteriormente la capa anaeróbica de materia orgánica, donde las bacterias sulforreductoras anaeróbicas producen alcalinidad carbonatada y el consiguiente incremento del pH. El agua tratada se descarga finalmente en una balsa de decantación, donde en contacto con el oxígeno atmosférico promueve la oxidación y subsiguiente precipitación de metales, o en segundo sistema de tratamiento.
- **Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):** Este tratamiento consiste en tanques metálicos o de cemento, de unos 1,5 a 1,8 metros de diámetro y unos 2,0 a 2,5 metros de profundidad, relleno con carbonato molido a tamaño de arena. El agua del cauce a tratar es desviada mediante tubos de conducción hacia un tubo vertical abierto por la base y situado en el interior del tanque. De esta forma, el agua incidente es descargada en el interior del tanque creando una turbulencia que favorece su contacto y reacción con los granos de carbonato produce una neutralización del agua, lo que favorece la precipitación de metales. Una vez tratada el agua es devuelta al cauce original mediante un nuevo sistema de conducción, aunque previamente puede ser depositada en una balsa situada aguas abajo del tanque, para permitir la precipitación de posibles flóculos metálicos.

### **Sistema de tratamiento con Cobertura Seca.**

El principal objetivo de estas coberturas es impedir la formación de drenaje ácido. La cobertura seca o cobertura de suelo es una alternativa cuando los factores climáticos, topográficos, hidrológicos, ambientales y económicos no favorecen la inundación de un área de disposición de residuos como solución de mitigación de generación del drenaje ácido, ya sea formando una barrera de transporte de oxígeno, barrera hidráulica o barrera capilar.

- **Barrera Hidráulica:** El principal objetivo de esta cobertura es limitar la infiltración, reduciendo así el volumen de percolado que atraviesa a la zona oxidada del interior de la pila de residuos pudiendo alcanzar las aguas subterráneas, así como disminuir o interrumpir el transporte de material soluble ya oxidado.

Una capa de arcilla compactada funciona como barrera al flujo de oxígeno y también puede funcionar como barrera hidráulica, impidiendo el flujo de agua por el interior de los depósitos. El uso de cobertura para el control del flujo de agua sería más adecuado en depósitos de residuos de disposición antigua estos ya intensamente oxidados, en los cuales usualmente existan gran cantidad de productos de reacciones de oxidación y ácido.

- **Barrera Capilar:** La barrera capilar está constituida de capas de suelos y materiales alternativos y funciona simultáneamente como una barrera de transporte de oxígeno y como barrera hidráulica.

El funcionamiento de una barrera capilar se basa en el contraste de la conductividad hidráulica no saturada de las capas de suelos superpuestas. Una capa de material arcilloso (o material fino) sobre una capa de material granular forma una barrera capilar simple.

### **Sistemas de control del agua en taludes.**

Los métodos de estabilización de deslizamientos que contemplen el control del agua, tanto superficial como subterránea son muy efectivos y son generalmente, más económicos que la construcción de grandes obras de contención, en cuanto tienden a desactivar la presión de poros, considerada como el principal elemento desestabilizante de los taludes.

Los sistemas más comunes para el control del agua son:

- Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial): Las zanjas en la corona o parte alta de un talud son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvias, evitando su paso por el talud. La zanja de coronación no debe construirse muy cerca del borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes o de una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos ya producidos; o se produzca la falla de la corona del talud o escarpe.
- Canales colectores en espina de pescado: Para disminuir la infiltración de agua en las áreas arriba del talud se acostumbra a construir canales colectores en espina de pescado, las cuales conducen las aguas colectadas, por la vía más directa hacia afuera de las áreas vulnerables del talud, entregándolas generalmente a canales en gradería. Estos canales deben impermeabilizarse adecuadamente para evitar la reinfiltración de las aguas.

### ***Tecnologías de bioingeniería.***

La estabilización de taludes por el uso combinado de vegetación y elementos estructurales adicionales trabajando de una manera conjunta e integrada, se le conoce como estabilización biotecnológica de taludes.

Pastos y plantas diseñadas con el propósito de producir refuerzo del suelo se pueden plantar junto con muros de contención o sistemas estructurales de estructura abierta, en forma de grilla, con espacios para el crecimiento de la vegetación.

La utilización de mantos orgánicos o mantos sintéticos junto con la vegetación conforman una protección integral contra la erosión. Generalmente, estos materiales se desintegran después de que las plantas crecen y se establecen en forma permanente.

- Estacas vivas: Las estacas vivas son longitudes de tallo de árboles y arbustos que se entierran en el suelo con el objeto de que broten árboles. El procedimiento es simple, rápido y económico. Las estacas vivas pueden utilizarse como un tratamiento primario en el cual las estacas cumplen un

objetivo de anclar otros elementos como trinchos o mantos vegetales, las cuales posteriormente se convertirían en árboles o arbustos.

- Fajinas vivas: Las fajinas son manojos de ramas que se entierran en zanjas poco profundas para que germinen en forma similar a como lo hacen las estacas vivas. Las zanjas generalmente, son excavadas a mano y forman un contorno a lo largo de las líneas de nivel del talud.

En taludes muy húmedos también se pueden colocar siguiendo la pendiente para facilitar el drenaje. Después de colocar las fajinas las zanjas se rellenan con suelo en tal forma que parte de las fajinas queda enterrada y parte expuesta. La longitud de los ramos de fajina varía de 0.50 a 1.0 metro.

El principal uso de las fajinas es el control de erosión, especialmente en zonas de cárcavas. Las fajinas a su vez forman unas líneas decorativas muy agradables al paisaje.

Las fajinas generalmente, se hacen con hierbas y juncos adaptados a las condiciones climáticas del sitio (Milián, 2012).

### ***Minería por transferencia.***

Es un método minero conocido internacionalmente como STRIPPING, que puede traducirse como “destape” o “descubierta”. Consiste en la explotación, desde la superficie, de una capa o capas que deben ser básicamente horizontales o sub-horizontales, mediante la apertura de un hueco inicial para el descubrimiento de la capa o capas y, tras la extracción de estas se procede a rellenar el hueco ya explotado con el estéril que se extrae de la siguiente capa.

Se trata de conseguir un hueco con la longitud de fondo suficiente que permita el inicio del proceso de relleno. La profundidad suele ser grande, llegándose en algunos casos a superar los 200 m.

### **Conclusiones**

En este capítulo se ha realizado un análisis de la problemática mundial del deterioro del medio ambiente y la rehabilitación minera como una de las soluciones a este fenómeno. Además se ha efectuado un estudio del procedimiento que se debe llevar a cabo para

la recuperación de las áreas afectadas por las explotaciones mineras a cielo abierto la que está dividida en seis etapas. Se propone desarrollar un sistema inteligente para informatizar las dos primeras etapas del mismo ya que las restantes requieren del trabajo directo de personal capacitado.

# 2

## CAPÍTULO

# Sistemas Expertos

Desde la aparición de las computadoras hasta nuestros días, los científicos han invertido grandes esfuerzos por tratar de dar cierta capacidad de decisión a estas máquinas, incluso un cierto grado de inteligencia.

Los sistemas expertos se pueden considerar como el primer producto verdaderamente operacional de la inteligencia artificial. Estos mejoran la productividad, ahorran tiempo y dinero, conservan valiosos conocimientos y los difunden más fácilmente. Es por esto que luego de un análisis del problema planteado en los apartados anteriores, se ha determinado la realización de un Sistema Experto (SE) para darle solución al mismo. En este capítulo se abordan los aspectos generales de los Sistemas Expertos.

## 2.1 ¿Qué es un Sistema Experto?

Desde su aparición, a mediados de 1960, los sistemas expertos se han definido como aquellos programas que se basan en el conocimiento y tratan de imitar el razonamiento de un experto para resolver un problema de un tópico definido. Su comportamiento se basa generalmente en reglas, es decir, se basa en conocimientos previamente definidos, y mediante estos conocimientos, los sistemas expertos son capaces de tomar decisiones.

Tanto los sistemas expertos como la Inteligencia Artificial han evolucionado a través de los años por lo que sería difícil definirlos, una definición formal de los sistemas expertos, aceptada por muchos autores, es la siguiente:

"Un sistema experto es visto como la incorporación en un ordenador de un componente basado en el conocimiento, que se obtiene a partir de la pericia (conocimiento técnico) de un experto, de tal forma que el sistema pueda ofrecer asesoramiento inteligente o

tomar una decisión inteligente sobre una función del proceso. Una característica adicional deseable, que muchos considerarían fundamental, es la capacidad del sistema, si se le solicita, de justificar su propia línea de razonamiento de un modo directamente inteligible para el interrogador"..." (Connell, 1987; Prado, 1991).

Un sistema experto es un sistema informático que simula los procesos de aprendizaje, memorización, razonamiento, comunicación y acción de un experto humano en una determinada rama de la ciencia, suministrando, de esta forma, un consultor que puede sustituirle con unas ciertas garantías de éxito. Podemos agregar otro concepto actual, dado por la Asociación Argentina de Inteligencia Artificial: "Los sistemas expertos permiten el desarrollo de otros sistemas que representan el conocimiento como una serie de reglas. Las distintas relaciones, conexiones y afinidades sobre un tema pueden ser compiladas en un sistema experto pudiendo incluir relaciones altamente complejas y con múltiples interacciones".

Las características mencionadas en las definiciones anteriores le permiten a un Sistema Experto almacenar datos y conocimiento, sacar conclusiones lógicas, ser capaces de tomar decisiones, aprender, comunicarse con expertos humanos o con otros Sistemas Expertos, explicar el razonamiento de su decisión y realizar acciones como consecuencia de todo lo anterior.

Se consideran como características importantes de los sistemas expertos las siguientes

- Pueden resolver problemas muy difíciles tan bien como los expertos humanos.
- Razonan heurísticamente, usando lo que los expertos consideran que son reglas empíricas efectivas, e interactúan con los humanos de forma adecuada, incluyendo el lenguaje natural.
- Manipulan y razonan sobre descripciones simbólicas.
- Pueden funcionar con datos que contienen errores, usando reglas de enjuiciamiento inciertas.
- Pueden contemplar múltiples hipótesis en competición simultáneamente.
- Pueden explicar por qué están formulando una pregunta.
- Pueden explicar su proceso de razonamiento y justificar sus conclusiones.

Los sistemas expertos han sido aplicados con éxito en múltiples campos como la medicina, geología, química, ingeniería, la agricultura, entre otros. Estos realizan tareas

muy diversas como interpretación, predicción, diagnóstico, diseño, planificación, instrucción, control, la monitorización etc. (Bello, 1998).

## **2.2 ¿Por qué desarrollar sistemas expertos?**

Es importante la realización de sistemas expertos, ya que con su ayuda, personas con poca experiencia pueden resolver problemas que requieren un "conocimiento formal especializado". Se pueden obtener conclusiones y resolver problemas de forma más rápida que con expertos humanos. Estos sistemas razonan pero en base a un conocimiento adquirido y no tienen sitio para la subjetividad. Se ha comprobado que tienen al menos, la misma competencia que un especialista.

Su uso es especialmente recomendado en las siguientes situaciones:

- Cuando los expertos humanos en una determinada materia son escasos.
- En situaciones complejas, donde la subjetividad humana puede llevar a conclusiones erróneas.
- Cuando es muy elevado el volumen de datos que ha de considerarse para obtener una conclusión (Sánchez, 1990).

Un problema puede ser resuelto usando un sistema experto cuando:

- Una solución del problema tiene una rentabilidad tan alta que justifica el desarrollo de un sistema, pues las soluciones son necesidades del área y no se ha trabajado en otros métodos para obtenerla.
- El problema puede resolverse sólo por un experto que puede dar forma a los conocimientos necesarios para resolver el problema, y la intervención del experto dará al sistema la experiencia que necesita.
- El problema puede resolverse solamente por un conocimiento experto en vez de usar algoritmos particulares.
- Se tiene acceso a un experto que puede dar forma a los conocimientos necesarios para resolver el problema.
- La intervención de un experto dará al sistema la experticia que este último necesita.
- El problema puede o no tener una solución única. Los Sistemas Expertos funcionan mejor con problemas que tienen un cierto número de soluciones aceptables (Shell, 1989).

### 2.3 Ventajas de los sistemas expertos.

- Están disponibles ininterrumpidamente de día y noche, ofreciendo siempre su máximo desempeño.
- Pueden duplicarse ilimitadamente, tener tantos de ellos como se requieran.
- Pueden trabajar en entornos hostiles y peligrosos.
- Siempre se ajustan a las normas establecidas y son consistentes en su desempeño, no desarrollan apreciaciones subjetivas, tendenciosas, irracionales o emocionales.
- No padece de olvido, fatiga, dolor, ni comete errores de cálculo.
- No requiere un sueldo, promociones, seguros médicos e incapacidades.
- Siempre están dispuestos a dar explicaciones, asistir o enseñar a la gente, así como a aprender.
- Pueden tener una vida de servicio ilimitada y están menos tiempo fuera de servicio (Shell, 1989).

**Tabla 1 Comparación entre Sistema Clásico y Sistema Experto.**

Sistemas Clásicos	Sistemas Expertos
El conocimiento y la lógica de proceso están mezclados en un programa.	La base de conocimientos y mecanismo de inferencia están separados.
No explican por qué se necesitan los datos ni porqué se llegó a un resultado.	Se designa una parte del sistema a la explicación.
Es difícil efectuar cambios en los conocimientos programados.	La base de conocimiento se modifica con facilidad.
Necesitan información completa para operar.	Pueden operar con información desconocida.
Generalmente manejan datos cuantitativos.	Manejan datos cualitativos primordialmente.
Captura, amplifica y distribuye el acceso a datos numéricos o textuales.	Captura, amplifica y distribuye el acceso a juicios basados en conocimientos.
No contiene errores.	Puede contener errores.
Se ejecuta paso a paso.	La ejecución usa heurística y lógica.

## **2.4 Componentes de un sistema experto.**

Los SE están conformados por dos componentes principales, la base de conocimiento y el motor de inferencia o programa de inferencia como también es nombrado (De Miguel, 2005).

- La base de conocimientos del SE es sobre el tema específico para el que se diseña el sistema. Este conocimiento se codifica según una notación específica que incluye reglas, predicados, redes semánticas y objetos.
- El motor de inferencia, combina los hechos y las preguntas particulares, utilizando la base de conocimiento, seleccionando los datos y pasos apropiados para presentar los resultados.

No existe una estructura común para los sistemas expertos. Sin embargo, la mayoría de los sistemas expertos tienen ciertos componentes básicos: base de conocimientos, motor de inferencia, base de datos e interfaz con el usuario. Muchos tienen, además, un módulo de explicación y un módulo de adquisición del conocimiento (Samper, 2011).

- **Base de Conocimiento:** Contiene el conocimiento especializado extraído del experto en el dominio. Es decir, contiene conocimiento general sobre el dominio en el que se trabaja. Un método común para representar el conocimiento es mediante reglas de producción. El dominio de conocimiento representado se divide en pequeñas fracciones de conocimiento o reglas.

Debido a la variedad de formas que el conocimiento puede asumir, los problemas involucrados en el desarrollo de una representación del conocimiento son complejos, interrelacionados y dependientes del objetivo. En términos generales, este debe estar representado de tal forma que (Rich y Knight, 1991):

- Capture generalizaciones.
- Sea comprendido por las personas que vayan a proporcionarlo y procesarlo.
- Sea fácilmente modificable.
- Se pueda usar en diversas situaciones, aun cuando no sea totalmente exacto o completo.
- Pueda ser utilizado para reducir el rango de posibilidades que usualmente debería considerarse para buscar soluciones (Sánchez, 1990).

- **La base de datos o base de hechos:** Es una parte de la memoria del ordenador que se utiliza para almacenar los datos recibidos inicialmente para la resolución de un problema. Contiene conocimiento sobre el caso concreto en que se trabaja. También se registrarán en ella las conclusiones intermedias y los datos generados en el proceso de inferencia. Al memorizar todos los resultados intermedios, conserva el vestigio de los razonamientos efectuados; por lo tanto, se puede utilizar explicar las deducciones y el comportamiento del sistema (Castillo, 1989).
- **Subsistema de adquisición de conocimiento:** Se encarga de controlar si el flujo de nuevo conocimiento a la base de datos es redundante. Sólo almacena la información que es nueva para la base de datos.
- **Motor de inferencia:** Este componente es básico para un SE; se encarga de obtener conclusiones comenzando desde el conocimiento abstracto hasta el conocimiento concreto. Si el conocimiento inicial es muy poco, y el sistema no puede obtener ninguna conclusión, se utilizará el subsistema de demanda de información.

Los sistemas basados en reglas, aquellos que utilizan la reglas de producción como forma de representación del conocimiento, tiene dos métodos básicos para realizar la inferencia: el encadenamiento hacia delante y el encadenamiento hacia atrás (Bello, 1998).

- **Subsistema de explicación.** Este componente entra en ejecución cuando el usuario solicita una explicación de las conclusiones obtenidas por el SE. Esto se facilita mediante el uso de una interfaz.
- **La interfaz de usuario:** Permite que el usuario pueda describir el problema al SE. Interpreta sus preguntas, los comandos y la información ofrecida. A la inversa, formula la información generada por el sistema incluyendo respuestas a las preguntas, explicaciones y justificaciones. Es decir, posibilita que la respuesta proporcionada por el sistema sea inteligible para el interesado. También puede solicitar más información al SE si le es necesaria. En algunos sistemas se utilizan técnicas de tratamiento del lenguaje natural para mejorar la comunicación entre el usuario y el SE (Castillo, 1989).

## **2.5 Metodologías para el desarrollo de Sistemas Expertos.**

En el desarrollo de sistemas expertos se plantean dos riesgos importantes:

- No existen implementaciones similares que puedan servir de orientación al encargado del desarrollo, en casi la totalidad de los casos.
- Los requisitos necesarios están esbozados con muy poca precisión. El diseño y la especificación requieren una temprana determinación de la interfaz del software y de la funcionalidad de los componentes.

Durante el desarrollo, resulta apropiado empezar con implementaciones de prueba para encontrar el camino hacia una solución definitiva y para hacerlas coincidir con las necesidades del usuario. Un método efectivo es la implementación de un prototipo de sistema experto que permita llevar a cabo las funciones más importantes de este.

A continuación se mencionan algunos métodos para el desarrollo de sistemas expertos.

### ***Método Grover***

El método Grover (Grover, 1983) se concentra en la definición del dominio (conocimiento, referencias, situaciones y procedimientos) en la formulación del conocimiento fundamental (reglas elementales, creencias y expectativas) y en la consolidación del conocimiento de base (revisión y ciclos de corrección).

La metodología de adquisición de conocimiento tiene tres fases: definición del dominio, formulación fundamental del conocimiento y consolidación del conocimiento basal.

#### **Etapa 1. Definición del dominio.**

Después que el problema es definido por el usuario, la primera fase de adquisición de conocimiento consiste en un cuidadoso entendimiento del dominio. El objetivo es la producción de un Manual de Definición de Dominios conteniendo:

- Descripción general del problema.
- Bibliografía de los documentos referenciados.
- Glosario de términos, acrónimos y símbolos.
- Identificación de expertos autorizados.
- Definición de métricas de funcionamiento apropiadas y realistas.
- Descripción de escenarios de ejemplos razonables.

#### **Etapa 2. Formulación fundamental del conocimiento.**

En la segunda fase de Adquisición de Conocimientos, se revisan los escenarios seleccionados por el experto. Esta revisión forma una base para determinar el funcionamiento mínimo, realizar las pruebas, efectuar la corrección y determinar las capacidades del sistema experto que pueden ser expandidas y sujetas a experimentación.

Esta base del conocimiento fundamental debe incluir: una ontología de entidades del dominio, relaciones entre objetos y descripciones objetivas, un léxico seleccionado, una definición de fuentes de entrada y formatos, una descripción del estado inicial incluyendo el conocimiento estático, un conjunto básico de razones y reglas de análisis, y una lista de estrategias humanas (meta-reglas), las cuales pueden ser consideradas por los diseñadores del sistema experto como reglas a incluir en la base de conocimiento.

### *Etapas 3. Consolidación del conocimiento Basal.*

El último paso en ese proceso es el ciclo de “revisión y mejoramiento” del conocimiento educido. En un sistema experto, esto refiere a que todos los componentes del sistema experto operacional están desarrollados, pero sin la amplitud ni profundidad que la versión final necesitará. Se debe, sin embargo, encontrar el conjunto de estándares mínimos en la definición del dominio. El conocimiento basal, entonces, es el conjunto de reglas y definiciones adecuadas para producir actividad basal.

### ***Método Weiss y Kulikowski***

Para el desarrollo de un sistema experto Weiss y Kulikowski (Weiss y Kulikowski, 1984) sugieren las siguientes etapas para el diseño e implementación de un sistema experto:

*Planteamiento del problema.* La primera etapa en cualquier proyecto es normalmente la definición del problema a resolver. Puesto que el objetivo principal de un sistema experto es responder a preguntas y resolver problemas, esta etapa es quizás la más importante en el desarrollo de un sistema experto. Si el sistema está mal definido, se espera que el sistema suministre respuestas erróneas.

*Encontrar expertos humanos* que puedan resolver el problema. En algunos casos, sin embargo, las bases de datos pueden jugar el papel del experto humano.

*Diseño de un sistema experto.* Esta etapa incluye el diseño de estructuras para almacenar el conocimiento, el motor de inferencia, el subsistema de explicación y la interfaz de usuario.

Elección de la herramienta de desarrollo. Debe decidirse si realizar un sistema experto a medida utilizando lenguaje de programación.

Desarrollo y prueba de un prototipo. Si el prototipo no pasa las pruebas requeridas, las etapas anteriores (con las modificaciones apropiadas) deben ser repetidas hasta que se obtenga un prototipo satisfactorio.

Refinamiento y generalización. En esta etapa se corrigen los fallos y se incluyen nuevas posibilidades no incorporadas en el diseño inicial.

Mantenimiento y puesta al día. En esta etapa el usuario plantea problemas o defectos del prototipo, corrige errores, actualiza el producto con nuevos avances.

Todas estas etapas influyen en la calidad del Sistema Experto resultante.

### **Método BGM**

El método BGM desarrollado por Blanqué y García Martínez (García, 1992), que se describe a continuación consta de 5 etapas:

#### Etapa 1: Adquisición de conocimiento.

Esta etapa consiste en pedirle al experto que hable sobre el conocimiento involucrado, recordándole al experto que el ingeniero de conocimiento es lego en el tema. El conocimiento de campo ocupa una parte del conocimiento del experto, este conocimiento tiene conexos con otros conocimientos que permiten que el experto lo articule, estos conocimientos conexos no son específicos del dominio de aplicación pero tienen que ver con él, es decir, hacen el sentido común necesario para aplicar esa área de conocimiento.

#### Etapa 2: Enunciación de conceptos.

En esta etapa se debe tomar nota de los conceptos más frecuentemente utilizados. Esto se logra observando la recurrencia del experto de campo sobre determinadas ideas, en esta etapa, la experiencia ha demostrado la conveniencia de mostrar una lista de tales conceptos al experto de campo y que él realice una clasificación del tipo:

- Conceptos primarios y secundarios
- Conceptos primarios, vinculantes y secundarios.

#### Etapa3: Parametrización de conceptos

Estos parámetros suelen estar asociados a valores tales como:

- Presencia / Ausencia
- Mucho / POCO / Nada

- Alto / Bajo / Medio
- Verdadero / Falsa
- Valores de confianza
- Valores Estadísticos, Probabilísticos
- Resultados numéricos de expresiones aritméticas o lógicas.

### **Metodología IDEAL**

Este método fue desarrollado por Pazos (Pazos, 1996) en la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid y sus siglas responden al nombre de cada una de las fases que la componen. Esta metodología está compuesta por 5 fases que se listan a continuación:

#### **Fase I. Identificación de la tarea.**

Etapa I.1. Plan de requisitos y adquisición de conocimientos.

Etapa I.2. Evaluación y selección de la tarea.

Etapa I.3. Definición de las características del sistema.

#### **Fase II. Desarrollo de los prototipos.**

Etapa II.1. Concepción de la solución.

Etapa II.2. Adquisición y conceptualización de los conocimientos.

Etapa II.3. Formalización de los conocimientos y definición de la arquitectura.

Etapa II.4. Selección de la herramienta e implementación.

Etapa II.5. Validación y evaluación del prototipo.

Etapa II.6. Definición de nuevos requisitos, especificaciones y diseño.

#### **Fase III. Ejecución de la construcción del sistema integrado.**

Etapa III.1. Requisitos y diseño de la integración.

Etapa III.2. Implementación y evaluación del sistema integrado.

Etapa III.3. Aceptación del sistema por el cliente.

#### **Fase IV. Actuación para conseguir el mantenimiento perfecto.**

Etapa IV.1. Definir el mantenimiento del sistema global.

Etapa IV.2. Definir el mantenimiento de las bases de conocimiento.

Etapa IV.3. Adquisición de nuevos conocimientos

#### **Fase V. Lograr una adecuada transferencia tecnológica.**

Etapa V.1. Organizar la transferencia tecnológica.

Etapa V.2. Completar la documentación del Sistema Basado en el Conocimiento construido.

A continuación se describen las fases I y II, que contienen la educación del conocimiento y son las desarrolladas en esta investigación.

### ***Fase I. Identificación de la tarea***

La fase I considera la definición de los objetivos del proyecto del sistema experto y determina si la tarea asociada es susceptible de ser tratada con la tecnología de Ingeniería del Conocimiento. En caso afirmativo se definen las características del problema, se especifican los requisitos que enmarcan la solución del problema. Esta fase se subdivide en las siguientes etapas:

*Etapa I.1. Plan de requisitos y adquisición de conocimientos:* Lo primero que debe hacer el ingeniero de conocimiento es tratar de identificar las necesidades del cliente describiendo para ello, los objetivos del sistema. Para confeccionar el plan de requisitos es necesario comenzar con la adquisición de conocimientos, entrevistándose con directivos, expertos y usuarios.

*Etapa I.2. Evaluación y selección de la tarea:* Esta etapa, que conforma el «estudio de viabilidad», se lleva a cabo realizando la evaluación de la tarea, cuantificando dicha evaluación para ver qué grado de dificultad presenta la tarea. Existen, varias formas de llevar a cabo dicha evaluación. Esta etapa es fundamental para evitar a priori fallas.

*Etapa I.3. Definiciones de las características de la tarea:* Aquí, se establecen y, eventualmente, definen las características más relevantes asociadas con el desarrollo de la aplicación. Con la definición de esta fase, los ingenieros de conocimiento, los expertos, usuarios y directivos, consiguen perfilar satisfactoriamente el ámbito del problema; definir coherentemente sus funcionalidades, rendimiento, e interfaces; analizar el entorno de la tarea el riesgo de desarrollo del sistema experto. Todo ello hace que el proyecto se justifique y asegura que los ingenieros de conocimiento y los clientes tengan la misma percepción de los objetivos del sistema.

### ***FASE II. Desarrollo de los prototipos.***

#### *Etapa II.1. Concepción de la solución.*

En esta etapa se define el grupo de expertos. Se realizan las primeras reuniones con los expertos y posibles usuarios del sistema para conocer a fondo el problema. Se realiza la orientación, por parte de estos, de la bibliografía a consultar y de las personas

que formarán parte del grupo de expertos para realizar la adquisición del conocimiento. En este período es donde se obtiene el conocimiento público.

*Etapa II.2. Adquisición y conceptualización de los conocimientos.*

Se obtiene el conocimiento privado de los expertos a través de una investigación profunda con el grupo de expertos. Se elaboran y realizan encuestas, cuestionarios o entrevistas teniendo en cuenta los requerimientos funcionales para determinar los conceptos importantes en el dominio del problema.

*Etapa II.3. Formalización de los conocimientos y definición de la arquitectura.*

Es en este período, donde se modelan los conocimientos representándolos con unos de los formalismos existentes. Se desarrolla un glosario de términos relacionados con el dominio del problema identificado en la tarea anterior. Se realiza el diagrama jerárquico de tareas que propone la metodología. Se realiza una descripción de las tareas que realiza el experto.

*Etapa II.4. Selección de la herramienta e implementación.*

Se realiza el diseño detallado del sistema (motor de inferencia, base de conocimientos, interfaces), se determinan los módulos del sistema teniendo en cuenta las tareas y se implementa el prototipo del sistema experto que incluye la base de conocimientos y la interfaz de usuarios.

*Etapa II.5. Validación y evaluación del prototipo.*

La fiabilidad de los resultados es, tal vez, el punto más sensible de todo sistema experto y por tanto su punto crítico. Es una de las tareas más difíciles dado que estos sistemas están contruidos para contextos en los que las decisiones son, en cierta medida, discutibles. Sin embargo, existen técnicas que permiten realizar esta validación de una forma satisfactoria. Para ello, se deben realizar las siguientes acciones, independientes entre sí pero complementarias:

*Etapa II.6. Definición de nuevos requisitos, especificaciones y diseño.*

Como ya se ha mencionado, los sistemas basados en conocimiento se construyen de forma incremental, primero un prototipo de investigación, que se convierte en un prototipo de campo para, finalmente, resultar un prototipo de operación. Esta etapa se corresponde con la definición de los requisitos, especificaciones y diseño del siguiente prototipo, que para ser construido deberá pasarse, de nuevo, por las etapas II.1 a II.5. Esta fase acaba con la obtención del sistema experto completo. (Pazos, 1996).

## **2.6 Lenguajes para construir sistemas expertos.**

Existen varios lenguajes para la creación de Sistemas Expertos, ya sea para el esquema de representación del conocimiento como para la máquina de inferencia. Para el desarrollo de esta investigación fue realizado un estudio sobre las posibles herramientas a utilizar en su construcción. Teniendo en cuenta las tendencias actuales y las novedades en este campo.

### **LISP**

LISP, acrónimo de lenguaje de Procesamiento de Listas, fue creado por John McCarthy y su equipo en la Universidad de Stanford a finales de 1950. Originalmente fue creado como un modelo computacional de procesos matemáticos, reflejando el rigor de las propias matemáticas. LISP actualmente está diseñado para manejar símbolos matemáticos (variables), por lo que es utilizado perfectamente para la investigación en Inteligencia Artificial (IA), donde un símbolo puede representar cualquier cosa.

LISP tiene dos características principales que lo hacen sobresalir de entre los demás lenguajes para IA (Hasemert, 1989):

- *Es altamente flexible*, es decir, es posible escribir un programa LISP para producir cualquier comportamiento deseable de la computadora.
- *Es indefinidamente extensible*, lo que significa que si como programador siente que a LISP le falta alguna característica, puede escribir un programa LISP que provea dicha característica y hacer que ese programa forme parte de su LISP personal.

LISP utiliza un ciclo llamado **leer - evaluar - imprimir**. Cuando el programador teclea algo en LISP, el lenguaje toma lo que se ha tecleado, intenta responder de cualquier forma y después despliega dicha respuesta en la pantalla. El término en LISP usado para “ver lo que se ha tecleado” es *leer*; el término usado para “tratar de responder de cualquier forma” es *evaluar*; y el término usado para “desplegar la respuesta en la pantalla” es *imprimir*. Si hubiera una persona en vez de una máquina en frente del programador, diríamos que dicha persona estaría escuchando, comprendiendo y respondiendo al programador. LISP utiliza los siguientes conceptos característicos:

- Listas y Átomos. La estructura más importante es la lista. Los átomos pueden subordinarse a cualidades.

- Cada función y cada programa LISP tiene estructura de lista. Los programas no pueden distinguirse sintácticamente de los datos. LISP ofrece sus propias funciones básicas. Forma de Trabajo.
- LISP es un lenguaje funcional. Ofrece la posibilidad de realizar definiciones recursivas de funciones. La unión de procedimientos se realiza de forma dinámica, es decir en plena ejecución, no como en otros lenguajes de programación. El sistema realiza automáticamente una gestión dinámica de memoria.

### **Prolog**

Prolog es un lenguaje de programación que se centra alrededor de un conjunto pequeño de mecanismos, incluyendo reconocimiento de patrones, estructuras de datos basadas en árboles y retroceso automático. Este conjunto pequeño constituye una estructura de programación sorprendentemente poderosa y flexible.

Prolog es ideal para resolver problemas que involucren objetos - en particular objetos estructurados - y relaciones entre ellos. Nació en Europa a principios de 1970 y fue implementado primeramente para dar soporte al Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN). El mismo trabaja esencialmente con la lógica matemática como lenguaje de programación (Bratko, 1999). Entre las características que hacen de Prolog un poderoso lenguaje de programación se encuentran:

- Predicados que expresan relaciones entre entidades.
- Un método para definir predicados mediante reglas de aserción y hechos.
- Un método para hacer preguntas para comenzar cómputos.
- Un procedimiento de búsqueda hacia atrás para evaluar metas.
- Estructura de datos que pueden simular registros estilo Pascal o listas estilo Lisp.
- Un reconocedor de patrones que construye y analiza las estructuras de datos.
- Un conjunto de predicados pre construidos para aritmética, entrada y salida y servicios de sistemas.

### **Smalltalk**

Smalltalk fue el primer lenguaje de programación que fue diseñado para basarse exclusivamente en objetos. Fue originalmente propuesto por Alan Kay en Xerox PARC en 1972, pero mucha gente le ha hecho importantes contribuciones al diseño del lenguaje. Este lenguaje se ha convertido en una opción muy popular en diversos

campos como los videojuegos y la Inteligencia Artificial. Virtualmente todo lo que existe en un sistema Smalltalk es una instancia de una clase particular de objeto y generalmente puede haber tantas instancias como se deseen. Esto significa que se pueden tener cualquier número de instancias de cualquier característica del sistema activas al mismo tiempo (Tello, 1989).

### **CLIPS**

CLIPS es otra herramienta para el desarrollo de SE. que ofrece un entorno completo para su construcción basado en reglas y objetos. CLIPS está siendo utilizado por numerosos usuarios como la NASA (que es su creadora), muchas universidades y empresas.

CLIPS significa “C Language Integrated Production System”, como su nombre indica uno de los objetivos que buscaban sus creadores era la fácil integración con programas en C y así, al darle una portabilidad con programas en lenguaje C.

CLIPS permite el desarrollo de sistemas de producción, encadenamiento hacia delante, cuenta con extensiones para lógica difusa (FuzzyCLIPS). El motor de inferencias incluye un sistema de mantenimiento de verdad, la adición dinámica de reglas, y diferentes estrategias de resolución de conflictos, incluye además un lenguaje orientado a objetos (COOL).

## **2.7 Aplicaciones de los sistemas expertos**

Los sistemas expertos han sido utilizados para la realización de diferentes tareas. A continuación se mencionan y se explican en qué consisten algunas de ellas:

- Recuperación de información.
- Reparación, corrección o terapia.
- Simulación, pronóstico o predicción.
- Interpretación, diagnóstico y monitoreo.
- Diseño y selección.
- Planificación.
- Control.

### ***Interpretación, diagnóstico y monitoreo***

La interpretación consiste en encontrar el significado de los datos de entrada obtenidos por sensores o introducidos por el usuario. Existen dos tipos de interpretación:

- **Análisis:** La interpretación de datos se obtiene mediante la separación o distinción de las partes que forman los datos.
- **Síntesis:** La interpretación de los datos se obtiene mediante la combinación de los mismos.

El diagnóstico consiste en identificar las causas internas que provocan un problema, avería o disfunción a partir de una serie de datos o síntomas que son consecuencia de la misma y que son observables.

La monitorización es un caso particular de la interpretación, y consiste en la comparación continua de los valores de las señales o datos de entrada y unos valores que actúan como criterios de normalidad o estándares.

### ***Diseño y selección***

El diseño es el proceso de especificar una descripción de un artefacto que satisface varias características desde un número de fuentes de conocimiento. Los SE, en diseño, ven este proceso como un problema de búsqueda de una solución óptima o adecuada. Las soluciones alternas pueden ser conocidas de antemano (problemas de derivación) o se pueden generar automáticamente (problemas de formulación).

Los SE prueban distintos diseños para verificar cuáles de ellos cumplen los requerimientos solicitados por el usuario, ésta técnica es llamada “generación y prueba”, por lo tanto estos SE son llamados de selección. En áreas de aplicación, la prueba se termina cuando se encuentra la primera solución; sin embargo, existen problemas más complejos en los que el objetivo es encontrar la solución más óptima. La utilidad de los programas basados en conocimientos aplicados a la ciencia y a la ingeniería no se limita al análisis sofisticado, muchos programas recientes han empezado a trabajar en la síntesis.

### ***Planificación***

La planificación es la realización de planes o secuencias de acciones y es un caso particular de la simulación. Está compuesto por un simulador y un sistema de control. El efecto final es la ordenación de un conjunto de acciones con el fin de conseguir un objetivo global (costo mínimo, tiempo mínimo, etc.).

### ***Control.***

Un sistema de control participa en la realización de las tareas de interpretación, diagnóstico y reparación de forma secuencial, con ello se consigue conducir o guiar un

proceso o sistema. Este tipo de sistema es complejo debido al número de funciones que deben manejar y el gran número de factores que deben considerar; esta complejidad creciente es otra de las razones que apuntan al uso del conocimiento, y por tanto de los SE.

### ***Instrucción***

Un sistema de instrucción (Sistema Experto para formación), realiza un seguimiento del proceso de aprendizaje de un estudiante. El sistema detecta errores de los estudiantes e identifica el remedio adecuado, es decir, desarrolla un plan de enseñanza para facilitar el proceso de aprendizaje y la corrección de errores.

### **Conclusiones**

En este capítulo se realizó un análisis de los aspectos importantes de los sistemas expertos tales como, características, aplicaciones, ventajas, entre otras. Se puede afirmar que los sistemas expertos son una poderosa y efectiva herramienta en situaciones de apoyo a la toma de decisiones. Por tales argumentos se ha decidido optar por la creación de un Sistema Experto para darle solución al problema de esta investigación.

# Desarrollo del prototipo del Sistema Experto SEMER

Para lograr disminuir el deterioro causado en el medio ambiente a causa del desarrollo de la industria minera fue elaborado un procedimiento estructurado para la recuperación minero-ambiental de los yacimientos de Santa Lucía en la provincia de Pinar del Río (Milián, 2012). Con el fin de agilizar el proceso de selección de las técnicas a utilizar se ha decidido desarrollar un prototipo de sistema experto que favorezca la toma de decisiones.

En este capítulo se muestran los aspectos fundamentales del proceso de desarrollo del prototipo de sistema experto SEMER (Sistema Experto Minero de Elección de Rehabilitación).

Luego de un análisis detallado de las metodologías existentes para desarrollar sistemas expertos, se eligió la metodología IDEAL para guiar el proceso, la cual propone el desarrollo incremental del sistema experto. Esto permite obtener un producto en constante evolución, es decir, un prototipo de sistema experto que puede ser perfeccionado con la adición de nuevas funcionalidades.

El proceso ha sido desarrollado hasta la fase dos de la metodología, puesto que el prototipo que se propone es la primera aproximación para la solución del problema y permite contar con un sistema funcional para probar con los expertos.

## **3.1 Características del sistema.**

Las primeras entrevistas con los expertos permitieron definir los requisitos funcionales y las principales características del sistema.

### ***Requisitos funcionales***

**R1: Recomendar uso del suelo.**

Entradas: Para ello el experto debe conocer el tipo de explotación del yacimiento aplicado, que puede ser de media ladera, hueco descendente, en seco, en húmedo.

Procesamiento: De acuerdo a cuál de ellos fue seleccionado se determina el uso que se debe dar.

Salida: Como resultado se recomendará el uso más adecuado para darle al suelo, este puede ser (Forestal, Reserva natural, No reserva natural húmeda, Agrícola, Recreativo, Industrial, Urbanístico, Reserva Natural húmeda).

**R2: Clasificar las áreas degradadas.**

Entradas: Es necesario en este caso conocer los resultados del estudio geoquímico de los drenajes del área. Se debe conocer la cantidad de especies químicas presentes y el pH del área.

Procesamiento: después de realizada la entrada de datos se realizan comparaciones y se determina el tipo de área degradada.

Salida: finalmente se obtiene como salida el tipo de área degradada la cual puede ser área de impacto intenso y área de impacto atenuado.

**R3: Determinar la calidad del agua.**

Entradas: Se deben conocer una serie de parámetros como son pH, conductividad eléctrica, existencia o no de afectaciones en las aguas superficiales y subterráneas, presencia de metales pesados y sus concentración y si existe o no vida acuática.

Procesamiento: Se realiza el análisis de estos parámetros y se clasifica la calidad del agua.

Salida: Como resultado el sistema clasificará el agua en buena, normal, regular o mala.

**R4: Recomendar técnica de rehabilitación.**

Entradas: Se deben conocer los tipos de menas, minerales predominantes en la mena, minerales secundarios, elementos presentes en composición química de la mena, extensión superficial del yacimiento y de los residuales sólidos y líquidos, si existen especies de fauna y especies endémicas de flora y fauna, uso que se le daba al suelo antes de ser explotado, características de los acuíferos, si existen poblaciones cercanas al yacimiento, densidad poblacional, calidad visual del paisaje, ángulo y la altura del talud, propiedades físico-mecánicas de las rocas, litología del yacimiento y si existe cubierta vegetal.

**Procesamiento:** Luego de tenerse esta información, es procesada para determinar que método de rehabilitación es el más adecuado.

**Salida:** El sistema dará como resultado la técnica de rehabilitación a aplicar: Enmienda Orgánica, neutralización con CaO(s), sistemas de producción sucesiva de alcalinidad, sistema de tratamiento con cobertura Seca (Barrera capilar), minería de transferencia, zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial), canales colectores en espina de pescado, tanques reactivos y tecnologías de bioingeniería (Estaca vivas y fajinas vivas).

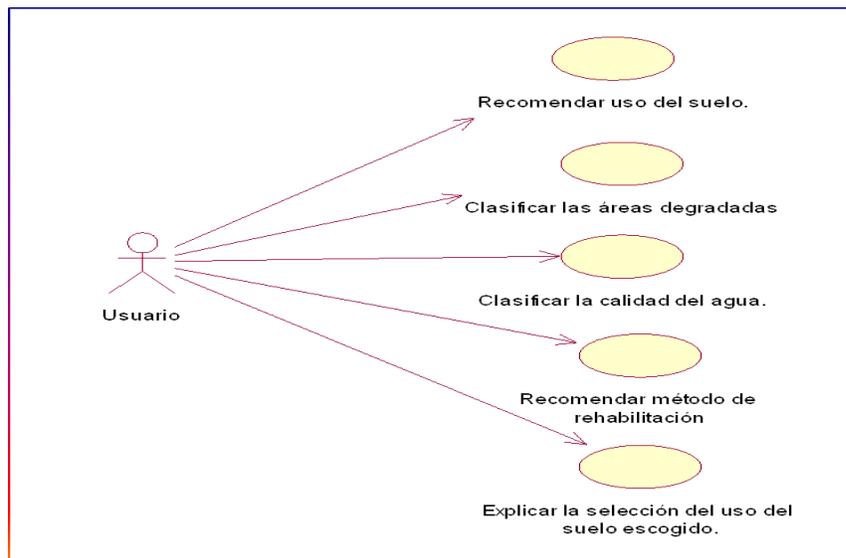
**R5: Explicar la selección del uso del suelo escogido.**

**Entradas:** Se parte del método de rehabilitación seleccionado resultado del procesamiento anterior (R4).

**Procesamiento:** Se analizan las situaciones tenidas en cuenta para seleccionar dicho método de rehabilitación y se emite una justificación acertada de cómo se llegó a tal selección.

**Salida:** Se cuenta con una justificación apropiada para el método de rehabilitación seleccionado.

En el siguiente diagrama de casos de usos se muestran todas las acciones que el usuario podrá realizar con el sistema experto.



**Figura 3.1 Diagrama de caso de uso del Sistema.**

Además, fueron definidas las características que debe cumplir el sistema, las cuales son:

- Para determinar el tipo de área degradada se deben especificar el pH del suelo y la cantidad de especies químicas que poseen los puntos de muestreo.
- Para clasificar la calidad del agua es necesario conocer si existen afectaciones en aguas superficiales y terrestres, existencia de vida acuática y presencia de metales pesados, además de valores tales como la conductividad eléctrica y el pH.
- Para recomendar el uso del suelo es necesario conocer el tipo de explotación aplicado al yacimiento.
- Para recomendar el método de rehabilitación es necesario conocer los minerales predominantes en la mena y los secundarios, la composición de la mena, extensión superficial del yacimiento, de los residuales sólidos y de los residuales líquidos, la calidad del agua, entre otras.
- El sistema no brindará explicaciones al usuario si no ha efectuado el proceso selectivo.

### **3.2 Estudio de Viabilidad**

En la etapa “Evaluación y selección de la tarea” se realizó el estudio de viabilidad para determinar si el problema planteado puede ser resuelto mediante un sistema experto. Para ello fueron evaluados los aspectos Plausibilidad, Adecuación, Justificación y Éxito, que caracterizan al problema.

#### ***Dimensión Plausibilidad***

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) se disponen de expertos en el campo de la minería, los cuales están dispuestos a colaborar con el proyecto brindando sus conocimientos. Además se cuenta con Internet y bibliografía especializada.

El experto principal, que apoya este proyecto, confirma que es capaz de estructurar sus métodos y procedimientos de trabajo.

La tarea está bien estructurada lo que ha permitido identificar la mayoría de las funciones que el sistema debe realizar:

- Clasificar las áreas degradadas.
- Recomendar uso del suelo.
- Clasificar la calidad del agua.

- Recomendar método de rehabilitación.
- Explicar la selección del uso del suelo escogido.

### ***Dimensión Justificación***

La selección del método de rehabilitación de los terrenos explotados por la actividad minera es un proceso intensamente engorroso, disponer de una herramienta de asistencia a expertos mineros en el desarrollo de tal proceso sería de gran utilidad. Además permitiría la disponibilidad de conocimientos y experiencia actualizada y en permanente crecimiento.

Se espera que el sistema ayude y pueda ser utilizado por todos los especialistas en minas para que se enfoquen en esta importante tarea. Debido a que esta labor de recuperación no ha tomado el auge que se necesita no existen la cantidad suficiente de expertos dedicados a ella.

### ***Dimensión Adecuación.***

Existen reglas empíricas que permiten transmitir la valoración de ciertos aspectos del dominio de la aplicación para subdividir el problema en subproblemas, que luego pueden ser documentados de acuerdo a reglas también claras según el dominio en cuestión. Esto hace factible que dicha experiencia pueda transmitirse a otras personas.

La actividad de selección del método de rehabilitación requiere en gran medida que las personas que la realizan posean una gran experiencia.

Se espera que la introducción del sistema experto no depare efectos adversos, ya que la tarea que realizará será asistir al experto en minas y rehabilitación minera, acelerando su trabajo y agregándole confiabilidad.

### ***Dimensión Éxito***

Los conocimientos se encuentran repartidos entre un conjunto de expertos en el ámbito de la minería, que se enfrentan al proceso de selección de métodos de rehabilitación, cuando se pretende recuperar áreas afectadas por la explotación minera.

El sistema debe explicar cada solución adoptada de modo que el usuario pueda entender cómo se realizó el proceso y a la vez comprender cómo debe continuar. Es muy importante la calidad de las respuestas, dado que una mala selección del método de rehabilitación lleva a fallas en la aplicación del procedimiento, retrasos y sobrecostos.

Teniendo en cuenta el estudio de las características anteriores llegamos a la conclusión de que el desarrollo del prototipo de SE si es viable, porque nuestro sistema cumple con las cuatro dimensiones que han sido estudiadas.

Los expertos esperan con mucho entusiasmo el desarrollo del sistema experto, debido a que este facilitará su trabajo y les brindará gran seguridad en su elección.

### **3.3 Adquisición del conocimiento.**

El proceso de adquisición del conocimiento fue realizado en tres etapas. Inicialmente se realizaron reuniones con los expertos que permitieron definir los requisitos funcionales del sistema y sus características, así como evaluar la viabilidad del proyecto.

A partir de la documentación aportada por los expertos, tales como textos sobre rehabilitación de áreas afectadas por la minería, informes de proyectos y trabajos de investigación realizados en los yacimientos y pasivos ambientales mineros de Santa Lucía. La revisión de la documentación permitió identificar las afectaciones fundamentales que se producen en los yacimientos piríticos-polimetálicos, los métodos de rehabilitación más utilizados y las correcciones que permiten realizar en el entorno. Además el ingeniero de conocimientos tuvo una preparación que favoreció la interrelación con los expertos.

Seguidamente, para poder tener los elementos suficientes para conformar la base de conocimientos (BC), fue aplicada una encuesta integradora del proceso (ver el apéndice A) que permitió identificar los valores de los parámetros involucrados en la rehabilitación y como estos inciden en la selección del método de rehabilitación.

### **3.4 Conceptualización.**

La conceptualización consiste básicamente en el entendimiento del dominio del problema y de la terminología usada, así como la modelización de la tarea que lleva a cabo el experto a la hora de resolver el problema.

Esta etapa permite al ingeniero de conocimiento conformar un marco inicial o mapa mental de los diferentes conocimientos del dominio que el experto utiliza durante la realización de su tarea.

Una vez que ha sido identificado el dominio, el siguiente paso consiste en estructurar los conocimientos para modelar el comportamiento del experto en la solución del problema que son de su competencia.

Se realizó el glosario de términos con el objetivo de lograr minimizar y eliminar las ambigüedades al interpretar o utilizar los términos.

**Tabla 2 Glosario de Términos.**

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
Yacimiento	La acumulación de minerales útiles en una u otra parte de la corteza terrestre, cuya explotación resulte económicamente racional, en determinado momento recibe el nombre de yacimiento mineral (Otaño, 1989).
Agua	Sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, líquida, inodora, insípida e incolora. Es el componente más abundante de la superficie terrestre y, más o menos puro, forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares; es parte constituyente de todos los organismos vivos y aparece en compuestos naturales (Encarta, 2009).
Acuífero	Acuífero, capa permeable de roca capaz de almacenar, filtrar y liberar agua (Encarta, 2009).
Acidez	Exceso de iones de hidrógeno en una disolución acuosa, en relación con los que existen en el agua pura. Se expresa en pH (Encarta, 2009).
Aguas subterráneas	Es el agua que se encuentra en el subsuelo, ocupando los espacios porosos o fracturas de las rocas (Burga, 2011).
Minerales primarios	Son los minerales formados conjuntamente con la solidificación del magma o de las soluciones mineralizantes (Burga, 2011).
Minerales secundarios	Los que han sufrido alteraciones o modificaciones en su constitución original, generalmente son los óxidos y sales (sulfatos, nitratos, etc.)(Burga, 2011).
Metal	Cada uno de los elementos químicos buenos conductores del calor y de la electricidad, con un brillo característico, y sólidos a temperatura ordinaria, salvo el mercurio. En sus sales en

*Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de rehabilitación minera.  
Capítulo III Desarrollo del prototipo de Sistema Experto SEMER*

	disolución forman iones electropositivos (cationes) (Encarta, 2009).
Paisaje	Aspectos morfológicos de una región producto final de todos los procesos geológicos realizados sobre los terrenos de dicha región (Burga, 2011).
Erosión	Destrucción de los materiales de la corteza terrestre por acción de los procesos geológicos (Benito, 1996).
Ecosistemas	Vivencia de animales y plantas en comunidad, combinación y asociación con los factores medio ambientales (Burga, 2011).
Pasivos Ambientales Mineros	Son todas las instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonada o inactiva y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. (Milián, 2012)
Rehabilitación minera	Se considera la recuperación del lugar alterado de acuerdo a un proyecto previo y en condiciones compatibles con el entorno, o sea reaprovecha el área para una nueva finalidad (comercial, agrícola, industrial, urbanística, recreativa, cultural), (Rubio, 1998).
Restauración	Es el proceso de integrar en el entorno los terrenos afectados por actividades extractivas y es una de las herramientas disponibles para reducir el impacto negativo ocasionado por la minería y abarca desde la recuperación del uso anterior de la tierra hasta la rehabilitación de la zona para dotarla de nuevos usos (Rubio, 1998).
Residual	Depósito mineral formado por concentración mecánica (placer aurífero) o por alteración química en la zona de meteorización (caolinita a partir de la alteración de feldespatos)(Benito, 1996).
Flora	Conjunto de vegetales de un país o región o de una edad del tiempo geológico (Burga, 2011).
Fauna	Conjunto de animales de un país o región de una determinada edad del tiempo geológico (Burga, 2011).
Suelo	Cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la

	alteración de los minerales de las rocas pre existente. La formación del suelo implica la meteorización química de los minerales primarios dando lugar a nuevos minerales (Burga, 2011).
Talud	Superficie inclinada del terreno que se extiende de la base a la cumbre de un cerro (Burga, 2011).

Seguidamente, fue definida la relación de los conceptos, sus atributos y los posibles valores. Esto permitió representar por cada concepto los atributos que lo caracterizan, además especificar las diferentes valores que puede llegar a poseer de cada atributo a lo largo de la resolución del problema.

**Tabla 1 Relación Concepto/ atributo/ valor**

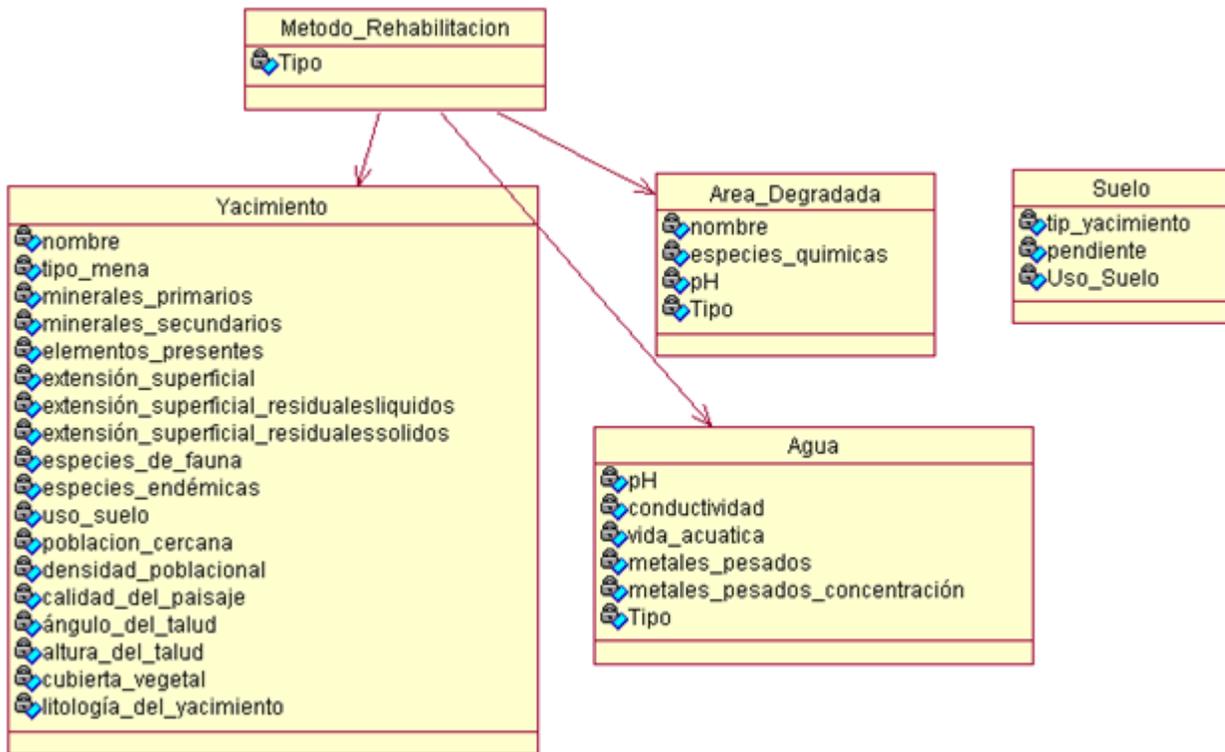
Concepto	Atributo	Valor
Yacimiento	Nombre	Texto que indica el nombre del yacimiento.
	Tipo_Mena	Pirítica, barítica.
	Minerales_Primarios	Pirita-Marcasita, esfalerita, galena, barita y calcopirita.
	Minerales_Secundarios	Pirrotina, calcopirita, hematita, magnetita, titanita, cerucita, goethita, anglesita, smithsonita, covelina, calcosina, calcita, dolomita, sericita, clorita, cuarzo, etc.
	Composición química	Plomo, cinc, hierro, cobre, bario, oro, plata, aluminio, mercurio, cadmio, molibdeno, talio, galio, arsénico, germanio, antimonio, azufre, silicio.
	Extensión superficial	Número real que determina la extensión superficial del yacimiento.
	Extensión superficial de residuales líquidos	Número real que determina la extensión superficial de los residuales líquidos.
	Extensión superficial de residuales sólidos	Número real que determina la extensión superficial de los residuales sólidos.
	Calidad paisaje	Mala, regular, normal, buena.
Poblaciones cercanas	Si, No	

*Sistema de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de rehabilitación minera.  
Capítulo III Desarrollo del prototipo de Sistema Experto SEMER*

	<p>Ángulo del talud</p> <p>Altura del talud</p> <p>Densidad poblacional</p> <p>Usos del suelo</p> <p>Especies de flora</p> <p>Especies endémicas</p> <p>Calidad del paisaje</p> <p>Cubierta vegetal</p> <p>Litología del yacimiento</p> <p>Tipo de explotación</p>	<p>Número real que indica el ángulo del talud.</p> <p>Número real que indica la altura del talud.</p> <p>Número real que indica la densidad poblacional.</p> <p>Forestal, Agrícola, Reserva natural, Industrial, Urbanístico, Recreativo, No reserva natural húmeda.</p> <p>Si, No.</p> <p>Si, No.</p> <p>Mala, regular, normal, buena.</p> <p>Si, No.</p> <p>Compacto o macizo, con grieta, gravilla amplia, gravilla fina, arcilloso, esquitoso.</p> <p>De media ladera, hueco descendente, en seco, en húmedo.</p>
Aguas	<p>Tipo</p> <p>pH (sigla de potencial de Hidrógeno)</p> <p>Conductividad eléctrica</p> <p>metales pesados</p> <p>Vida acuática</p> <p>Calidad del agua</p>	<p>Ácida, básica, normal.</p> <p>Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución.</p> <p>Número real que indica la conductividad eléctrica.</p> <p>Números reales que indican los valores de los metales pesados existentes en la mena.</p> <p>Si, No.</p> <p>Mala, regular, normal, buena.</p>
Áreas degradadas	<p>Nombre</p> <p>Especies químicas</p> <p>Tipo de área</p> <p>pH</p>	<p>Texto que indica el nombre del área.</p> <p>Texto que indica la cantidad de especies químicas encontradas en el área (varían desde 1 hasta 5).</p> <p>Impacto intenso, Impacto atenuado.</p> <p>Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución.</p>
Suelos	<p>Pendiente</p> <p>Uso del suelo</p>	<p>Poca, Mucha.</p> <p>Forestal, Agrícola, Reserva natural, Industrial, Urbanístico, Recreativo, No reserva natural húmeda.</p>
Método de rehabilitación	<p>Técnica</p>	<p>Enmienda orgánica, Procesos de neutralización, Sistemas de tratamiento de aguas contaminadas por minería, Sistema de tratamiento con Cobertura</p>

		Seca de suelo, Minería por transferencia, Sistemas de control del agua en taludes, Tecnologías de bioingeniería.
--	--	--

A continuación fueron identificadas las relaciones entre los conceptos, que permitió determinar la secuencia lógica que tendrá el sistema. La figura siguiente muestra la relación entre los conceptos.



**Figura 3.2 Mapa de conocimientos.**

### 3.6 Formalización.

En esta etapa se realizó la representación del conocimiento por medio de reglas de producción. Estas permiten expresar fácilmente el modo de razonamiento que utilizan los expertos ambientales para decidir el tipo de rehabilitación que aplicarán. A continuación se muestran las reglas obtenidas especificadas en lenguaje natural.

#### Reglas en lenguaje natural

- **Clasificar el área degradada.**
  - Si las especies químicas se encuentran entre 3 y 5 y el pH es menor que 3,5 entonces es una zona de impacto intenso.

- Si las especies químicas se encuentran entre 2 y 3 y el pH es mayor que 3,5 entonces es una zona de impacto atenuado.
  
- **Recomendar uso del suelo.**
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es a media ladera entonces el uso que se le puede dar al terreno es Forestal, Reserva Natural o Reserva Natural Húmeda.
  
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es a media ladera y la zona es de poca pendiente entonces el uso que se le puede dar al terreno es Agrícola, Recreativo, Industrial y Urbanístico.
  
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es hueco descendente entonces el uso que se le puede dar al terreno es Forestal y Reserva Natural.
  
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es hueco descendente y la zona es de poca pendiente entonces el uso que se le puede dar al terreno Agrícola.
  
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es en seco y la zona de poca pendiente entonces el uso que se le puede dar al terreno es Agrícola, Recreativo, Industrial, Urbanístico, Reserva natural, Forestal.
  
  - Si el tipo de explotación del yacimiento es húmedo entonces el uso que se le puede dar al terreno es Reserva Natural Húmeda.
  
- **Determinar calidad del agua.**
  - Si el pH del agua es menor que 6 entonces el agua es ácida.
  
  - Si el pH del agua es mayor que 9 entonces el agua es básica.
  
  - Si el pH está entre 6 y 9 entonces el agua es normal.
  
  - Si la concentración de plomo en las aguas superficiales y subterráneas es mayor de 0.05 entonces hay presencia de metales pesados.

- Si la concentración de zinc en las aguas superficiales y subterráneas es mayor de 15 entonces hay presencia de metales pesados.
- Si la concentración de calcio en las aguas superficiales y subterráneas es mayor de 200 entonces hay presencia de metales pesados.
- **Recomendar técnica de rehabilitación.**
  - Si el uso del suelo es Forestal, Reserva natural o Agrícola entonces la técnica aplicar es Enmienda Orgánica.
  - Si existen especies endémicas de flora y fauna entonces la técnica aplicar es Enmienda Orgánica.
  - Si el agua es ácida y hay presencia de metales pesados entonces la técnica a aplicar es Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad.

### **3.7 Implementación.**

En esta etapa se seleccionaron las herramientas para implementar el sistema, una herramienta que permitiera traducir el conocimiento formalizado en un modelo capaz de ser interpretado por una computadora.

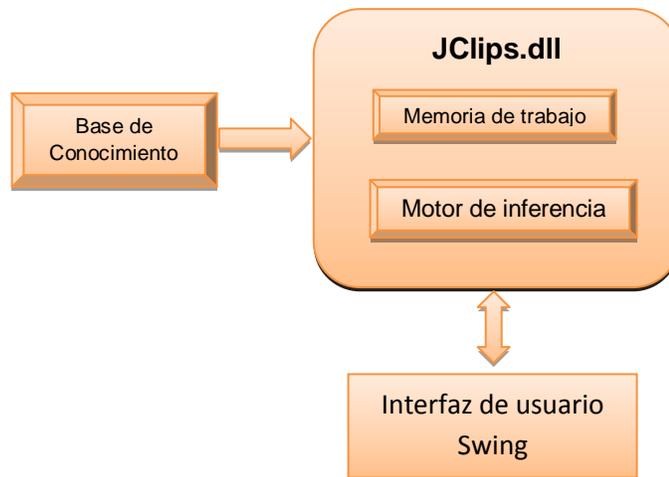
La implementación de un sistema basado en conocimiento exige una herramienta de desarrollo que proporcione los formalismos de representación en los cuales puede codificarse la base de conocimientos, así como los mecanismos de inferencia y control que pueden interpretar la base de conocimientos para ejecutar la tarea deseada.

Fue seleccionado CLIPS versión 6.24, pues provee un ambiente de desarrollo para la producción y ejecución de sistemas expertos. Permite manejar una amplia variedad de conocimiento, contiene funcionalidades que permiten verificar las reglas incluidas en el sistema experto que está siendo desarrollado.

Para la implementación de la interfaz de usuario se escoge como lenguaje de programación **Java**. Este último es un lenguaje moderno, de alto nivel, que recoge los elementos de programación que típicamente se encuentran en todos los lenguajes de programación, permitiendo la realización de programas profesionales.

La integración de Java con la librería JClips, permite la integración de CLIPS y Java, se escogida como herramientas más viable para la implementación del sistema experto que se propone.

En la figura 3.3 se muestra la arquitectura del sistema experto desarrollado, que fue realizada tomando como guía la arquitectura tradicional de los sistemas expertos.



**Figura 3.3 Arquitectura del sistema.**

El sistema desarrollado cuenta con una interfaz de usuario implementada en Java con el uso de la librería javax.swing. El usuario introduce los datos a través de la interfaz que se conecta con CLIPS mediante la librería JClips.dll. La información se guarda como hechos en la memoria de trabajo. Estos hechos activan las reglas de la base de conocimiento y el motor de inferencia utiliza el encadenamiento hacia delante y genera la respuesta que se muestra al usuario a través de la interfaz de usuario.

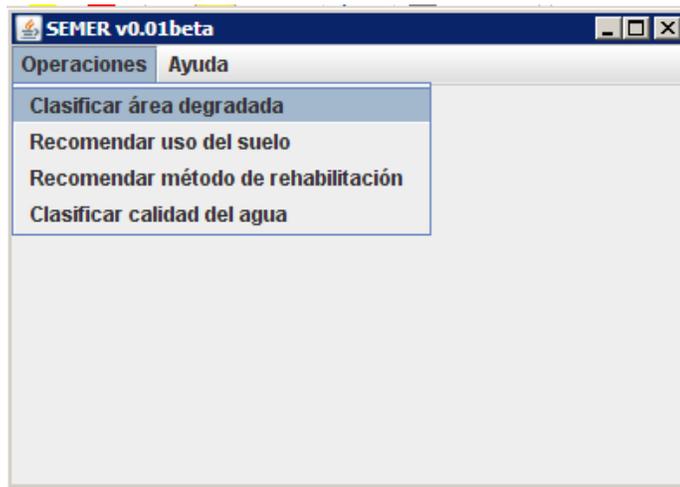
### **3.8 Pruebas del sistema.**

**SEMER** surge a partir de la necesidad de agilizar el proceso de selección del método de rehabilitación más adecuado para la recuperación de los yacimientos piríticos polimetálicos. Su introducción como herramienta informática dentro de la minería generará grandes beneficios ya que se espera brinde un alto grado de certeza en el

proceso de selección, además de reducir en un alto grado el tiempo que requiere esta actividad.

Para realizar la comprobación del primer prototipo de este sistema experto se ha seleccionado como caso de prueba el yacimiento de Santa Lucía al tener áreas consideradas pasivos ambientales, el mismo está ubicado 2 Km al sur del poblado del mismo nombre y a unos 8 Km al norte de Minas de Matahambre.

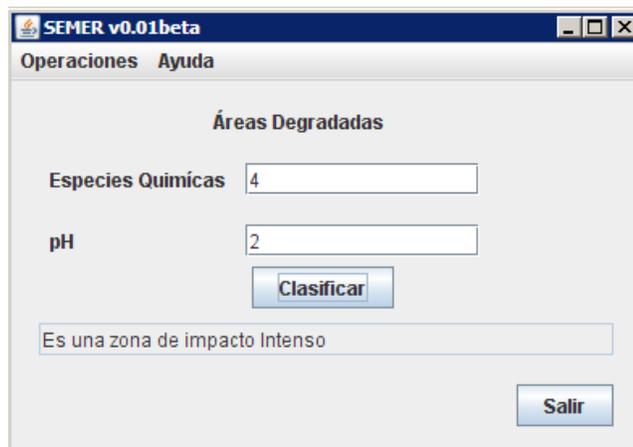
Al instalar y abrir el sistema aparecerá la siguiente interfaz donde aparecerán las operaciones que se pueden realizar dentro de un menú desplegable.



**Figura 3.4 Interfaz de Usuario**

En la figura 3.4 se ha seleccionado la opción de clasificar el área degradada, seguidamente aparecerá otra interfaz donde se debe especificar dos de los parámetros medioambientales y el sistema clasificará las áreas en:

- ✓ Áreas de Impacto intenso
- ✓ Áreas de Impacto atenuado



**Figura 3.5 Interfaz clasificar el tipo de Área degradada.**

Al seleccionar la opción Recomendar uso del suelo aparecerá la siguiente interfaz:

The screenshot shows a window titled "SEMER v0.01beta" with a menu bar containing "Operaciones" and "Ayuda". The main area is titled "Seleccione el Tipo de Yacimiento" and contains several options: "De media ladera" (checked), "En seco", "Hueco descendente", and "En Húmedo". Below these is a "Pendiente" dropdown menu set to "Poca". A "Recomendar uso del suelo" button is present. A text box displays the following recommendations: "Se recomienda el uso Forestal", "Se recomienda el uso Reserva natural", and "No se recomienda para reserva natural húmeda". A "Salir" button is at the bottom right.

**Figura 3.6 Interfaz para seleccionar tipo de explotación del yacimiento.**

Para clasificar la calidad del agua se debe de dar valores a los parámetros y el sistema clasificará el agua en mala, regular, normal o buena.

The screenshot shows a window titled "SEMER v0.01beta" with a menu bar containing "Operaciones" and "Ayuda". The main area is titled "Clasificación de las aguas" and contains several questions and input fields: "¿Existen afectaciones en las aguas superficiales?" (Si), "¿Existen afectaciones en las aguas Subterráneas?" (Si), "¿Existe vida acuática?" (No), "¿Cuál es la conductividad de las aguas?" (4657), and "¿Cual es el pH de las aguas?" (2.8). Below these is a section for "Concentración de metales en las aguas (%)" with input fields for Plomo (0.08), Zinc (0.03), Calcio (-), Hierro (-), Arsénico (0.7), Magnesio (-), Cadmio (0.1), Aluminio (-), and Bario (53.8). A "Clasificar" button is next to a dropdown menu showing "Mala". A "Salir" button is at the bottom right.

**Figura 3.7 Interfaz para determinar la calidad del agua.**

Finalmente se seleccionará la opción en la página principal recomendar método de rehabilitación y aparecerán una secuencia de interfaces que a medida que se vayan respondiendo se cliqueara en el botón **Siguiente**, para ir a la que le sigue.

SEMER v0.01beta

Operaciones Ayuda

Nombre: Santa Lucía

Extensión superficial del yacimiento:

Extensión superficial de los residuales sólidos:

Extensión superficial de los residuales líquidos:

Tipo de Mena: Pirítica

Minerales predominantes en la mena:

Pirita\_Marcasita  Galena  Esfalerita  Barita  Calcopirita

Minerales Secundarios:

Pirrotina  Hidrogoethita  Goethita  Anglesita  Titanita

Smithsonita  Calcopirita  Calcosina  Hidrómicas  Clorita

Sericita  Calcita  Cuarzo  Serucita  Hidrolepídocranita

Covelina  Magnetita  Dolomita  Hematita

Siguiente

**Figura 3.8** Interfaz para determinar los minerales predominantes en la mena.

La última interfaz es la presentación del método de rehabilitación recomendado y sus características principales.

SEMER v0.01beta

Operaciones Ayuda

Se recomienda la utilización de...

Enmienda orgánica

Características del método:

El objetivo de la aplicación de este tipo de enmienda es proporcionar niveles de materia orgánica al suelo, lo que implica un descenso de los valores de la erosión con un aumento de la estabilidad de compuestos arcillo - húmicos del suelo al aumentar la cohesión de los residuos mineros.

Salir

**Figura 3.9** Interfaz para determinar el método de Rehabilitación Recomendado.

## Conclusiones

Al culminar la implementación se ha obtenido una importante herramienta informática capaz de realizar operaciones que para un experto humano podría demorar hasta tres meses en obtener

resultado. Es un sistema confiable que realiza un estudio minucioso de cada uno de los parámetros medio ambientales para buscar el método más adecuado de rehabilitación para las condiciones específicas de cada área degradada.

# Conclusiones Generales

Durante la realización de este trabajo se realizaron estudios sobre la industria minera y los procesos de rehabilitación quedando especificadas las características esenciales de cada uno de los métodos de recuperación estudiados y las distintas etapas que se deben realizar para poder llevar a cabo esta vital actividad que es la rehabilitación minera.

Además se abordaron aspectos importantes y específicos de los Sistemas Expertos tales como sus características, aplicaciones, ventajas y otros aspectos que corroboraron que un sistema experto era una excelente manera de resolver el problema planteado.

También se describió como se llevó a cabo la implementación del sistema siguiendo los pasos que sugiere la metodología de desarrollo utilizada obteniendo un prototipo de Sistema Experto capaz de apoyar la toma de decisiones en el proceso de selección el método de rehabilitación para la recuperación de los yacimientos piríticos-polimetálicos.

# Recomendaciones

- Incluir un módulo de adquisición de conocimiento que permita enriquecer la base de conocimiento en función de los intereses de los expertos ambientales.
- Incluir un módulo de explicación para que el sistema pueda servir como entrenador a otros expertos.

# Bibliografía

- Angulo, J.M. & del Mora, I A. 1994. *Guía fácil de la Inteligencia Artificial*. Editorial Paraninfo. 2da Ed.. Madrid.
- Arteaga, R. & Armijos, J. *Tutorial de Programación Heurística*. Disponible en: [www.uc3m.es/cgi-bin/nph-count](http://www.uc3m.es/cgi-bin/nph-count). Consultado: 14 de enero de 2013.
- ASOCIACIÓN ARGENTINA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Glosario.
- Bañares, J. 2008. Herramientas para el desarrollo del ICAIC. Disponible en: <http://diana.cps.unizar.es/banares/IA/noticias.html>. Consultado: 12 de diciembre de 2012.
- Bello, R. 1998. *Introducción a la Inteligencia Artificial*. Ciencias de la Computación, Universidad Central de Las Villas. Villa Clara : p. 171.
- Benito, A.; et al, 1996. *Manual de Rocas Ornamentales: Prospección, Explotación, Elaboración, Colocación*. 2 ed. Madrid: ,p 696.
- Bradshaw, A. D. 1990. *The reclamation of derelict and the ecology of ecosystems*. En: W.R. Jordan III, M.E. Gilpin y J.D. Aber (Eds.). *Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research*. Cambridge. University Press, EE.UU. pp. 53-74.
- Bratko, I. 1999. *Prolog programming for Artificial Intelligence*. 2da. New York : Addison Wesley.
- Burga, J. 2011. *Diccionario Geológico*. Arthaluna, Grouting, Geotechnical Instrumentation.
- Carrillo, J. 1987 Metodología para el desarrollo de sistemas expertos. Tesis doctoral. Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid
- Castillo ,E. 1989 *Sistemas Expertos: aprendizaje e incertidumbre*. Editorial Paraninfo, S.A. Madrid.
- Cañete, C.; Krebs, A.; Marmos, L.; Ponce, N.; Milián, E. & Barrios, E. 2009. Principales resultados del Proyecto de Colaboración Cuba-Brasil. "Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de Santa Lucía en el occidente de Cuba. En: VIII Congreso Cubano de Geología. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009.
- Chisholm, A.; Dumsday, R. 1987. *Land degradation: problems and policies*. London: John Wiley, 404 p.
- Connell, N. A. D. 1987. Expert Systems in Accounting: A Review of Some Recent Applications. *Accounting and Business Research*, vol. 17, n°. 67, invierno, 1987, pp. 221- 233.
- Criado, J.M. 2002 *Sistemas Expertos*. Disponible en: <http://home.worldonline.es/jmariocr/>. Consultado: 12 de diciembre 2012.
- De Miguel, L. 2005. *Técnicas de Mantenimiento Predictivo Industrial basadas en Sistemas Expertos*. Disponible en: <http://www.cartif.es/mantenimiento/expertos.html>. Consultado: 12 de diciembre 2012.
- Fernández, R. 1998: *Clausura de minas: impactos hidrológicos*. Congreso Nacional del medio ambiente. Cumbre Desarrollo Sostenible. Consejo Superior de Colegios de ingenieros en minas. Oviedo. España.
- García, R. 1992. *Construcción de Sistemas Expertos*. Imprenta del CEI-UBA. Argentina. 154 p.

- García Rivero, A. E. 2011. *Principales problemas que confronta el proceso de rehabilitación de áreas impactadas por la minería del níquel en Cuba*. Memorias del evento Geociencias 2011.
- Gobierno de Cuba. *Ley 76 de Minas*. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición ordinaria, Año XCIII. La Habana, 23 de enero de 1995.
- Grover, M. 1983. *A Pragmatic Knowledge Aquisition Methodology*. Proceedings VIII IJCAI. Estados Unidos.
- Hasemert, J. 1989. *Common LISP Programming for Artificial Inteligence*. Addison Wesley. New York.
- Hayes-Roth, Frederick. 1984. *Knowledge-based expert systems: the state of the art in the US*. En J. Fox (Ed.) *Expert systems: State of the Art Report*. Pergamon Infotech, Maidenhead, Berkshire. pp. 49-62.
- Herrero, G., Bruzón, N., Batista, K. y Herrera, P. 2009.,. *Reforestación de terrenos degradados por la industria minera a cielo abierto*. In: Memorias del XIII Congreso Forestal mundial realizado del 18 al 23 de octubre del 2009. FAO/ Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la República Argentina/Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Buenos Aires, Argentina.
- Huenelaf, A., Huatatoca. 2006. *Propuesta de Recuperación Ambiental del Yacimiento polimetálico, Santa Lucía*. Tesis de grado, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saiz Montes de Oca. 2006.
- Rich, Elaine y Knight, Kevin. 1991. *Artificial Intelligence*. Mc GrawHill.
- Microsoft Encarta 2009. Microsoft Corporation.
- Milian Milián, Estrella. 2006. *Metodología de evaluación de impacto ambiental en yacimientos piríticos polimetálicos de Pinar del Río*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 100 p
- Milian Milián, Estrella. 2012. *Procedimiento para la Rehabilitación Minero Ambiental de los yacimientos piríticos polimetálicos cubanos*. Revista Geología y Minería, Vol. 28, No. 4.
- Oblasser, A., Chaparro, E. 2008. *Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos*. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Comisión Económica para América Latina.
- Otaño N., Blanco T 1989..*Nociones de minería*. La Habana: ENPES, 1989.
- Ledo, Nicolás y Palacios, Daniel. 2010. *Sistema Experto para la Identificación de Riesgos en el Desarrollo de Software*. Trabajo Profesional. Universidad de Buenos aires, Argentina.
- Parsaye K. et al. *Intelligent Databases*. Editorial Wiley. New York, 1989.
- Pazos J. 1996. *Introducción a la Ingeniería del Conocimiento*. Material del Magister en ingeniería del Software. Convenio ITBA-UPM. Unidad 19.
- Ponce, N.; Alfonso, E. y Cañete, C. 1997: *Evaluación y predicción de impactos ambientales en la minería*. Informe de proyecto, Ministerio de la Industria Básica.
- Pous, A. 1985. *Recuperación de zonas devastadas por los trabajos mineros*. Revista Tecnológica. Geología. Vol. XV.
- Prado Lorenzo, J M. 1991. La aplicación de Sistemas Expertos al análisis de estados financieros. En Memoria de M<sup>a</sup> Ángeles Gil Luezas. Editorial AC, Madrid.

- 
- Rubio, R. 1998. *Clausura de minas: impactos hidrológicos*. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre Desarrollo Sostenible. Consejo Superior de Colegios de Ingenieros en Minas. Principado de Asturias, Oviedo, España.
- Samper, J. 2011. *Sistemas Expertos del Conocimiento al poder*. Disponible en: [www.psycologia.com/articulos/arjsamper01.html](http://www.psycologia.com/articulos/arjsamper01.html).
- Sánchez, Beltrán J.P., 1990 *Sistemas Expertos: Una metodología de programación*. Macrobit. México.
- Sell, P., 1989 *Sistemas Expertos para principiantes*. Velásquez. Noriega Editores. México.
- Tello, E., 1989. *Object Oriented Programming for Artificial Intelligence*. Addison Wesley. New York.
- Urbino, J. y Díaz, B. 2011: *Rehabilitación ambiental minera, una opción holística*. En: IV Congreso Cubano de Minería. Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011.
- Waterman, D.A. 1986. *A Guide to Expert Systems*. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.
- Weiss, S.M.; Kulikowski, C.A. 1984. *A practical Guide to Designing Expert Systems*. Rowman & Allanheld Publishers.

# Apéndices

## Apéndice A

Encuesta #1.

1.1 Defina los valores que le permitan evaluar la calidad del agua según los parámetros especificados.

	<b>Mala</b>	<b>Regular</b>	<b>Normal</b>	<b>Buena</b>
<b>pH</b>				
<b>Conductividad eléctrica</b>				
<b>Afectaciones en aguas superficiales</b>				
<b>Afectaciones en aguas subterráneas</b>				
<b>Presencia de vida acuática</b>				
<b>Existencia de metales pesados</b>				

1.2 Seleccione con una X, que uso del suelo recomienda para cada tipo de explotación del yacimiento.

	<b>De media ladera</b>	<b>Hueco descendente</b>	<b>En seco</b>	<b>En Húmedo</b>
<b>Forestal</b>				
<b>Agrícola</b>				
<b>Recreativo</b>				
<b>Industrial</b>				

<b>Urbanístico</b>				
<b>Reserva natural</b>				
<b>No reserva natural húmeda</b>				
<b>Reserva Natural húmeda</b>				

1.3 Para seleccionar el método de rehabilitación más adecuado de acuerdo con las características de la zona que se desea recuperar es necesario valorar una serie de parámetros medioambientales que relacionamos a continuación. Diga los valores que estos deben tomar para aplicar cada uno de estos métodos.

1.3.1 a) Minerales primarios predominantes en la mena.

	<b>(FeS<sub>2</sub>),</b>	<b>(ZnS),</b>	<b>(PbS),</b>	<b>(BaSO<sub>4</sub>)</b>	<b>(FeCuS)</b>
<b>Enmienda orgánica</b>					
<b>Neutralización con CaO(s)</b>					
<b>Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad</b>					
<b>Sistema de tratamiento con Cobertura Seca( Barrera capilar)</b>					
<b>Minería de transferencia</b>					
<b>Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):</b>					
<b>Canales colectores en espina de pescado</b>					
<b>Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):</b>					

<b>Tecnologías de bioingeniería ( Estaca vivas y fajinas vivas)</b>					
---	--	--	--	--	--

b) Minerales secundarios predominantes en la mena.

	(FeO, 8-1S)	(FeCuS <sub>2</sub> )	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(CaTiSiO <sub>5</sub> )	(PbCO <sub>3</sub> )	(α-FeO(OH))	(PbSO <sub>4</sub> )	(ZnCO <sub>3</sub> )	(CuS)	(Cu <sub>2</sub> S)	(CaCO <sub>3</sub> )	(CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	(SiO <sub>2</sub> )
<b>Enmienda orgánica</b>													
<b>Neutralización con CaO(s)</b>													
<b>Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad</b>													
<b>Sistema de tratamiento con Cobertura Seca (Barrera capilar)</b>													
<b>Minería de transferencia</b>													
<b>Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):</b>													
<b>Canales colectores</b>													

<b>en espina de pescado</b>																			
<b>Tanques Reactivos (Limestone e Diversión Wells):</b>																			
<b>Tecnologías de bioingeniería (Estacas vivas y fajinas vivas)</b>																			

c) Elementos presentes en la composición química de la mena.

	(Pb)	(Zn)	(Fe)	(Cu)	(Ba)	(Au)	(Ag)	(Al)	(Hg)	(Cd)	(Mo)	(Ta)	(Ga)	(As)	(Ge)	(Sb)	S	S	i	
<b>Enmienda orgánica</b>																				
<b>Neutralización con CaO(s)</b>																				
<b>Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad</b>																				
<b>Sistema de tratamiento con Cobertura Seca( Barrera capilar)</b>																				
<b>Minería de transferencia</b>																				

<b>Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):</b>																			
<b>Canales colectores en espina de pescado</b>																			
<b>Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):</b>																			
<b>Tecnologías de bioingeniería ( Estaca vivas y fajinas vivas)</b>																			

1.3.2 a) Diga si deben existir o no cada uno de los siguientes parámetros para aplicar las tecnologías de rehabilitación.

	<b>Cubierta vegetal</b>	<b>Poblaciones cercanas al yacimiento</b>	<b>Especies endémicas de flora y fauna</b>	<b>Especies de fauna</b>	<b>Poblaciones cercanas</b>
<b>Enmienda orgánica</b>					
<b>Neutralización con CaO(s)</b>					
<b>Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad</b>					
<b>Sistema de tratamiento con Cobertura Seca( Barrera capilar)</b>					
<b>Minería de transferencia</b>					

<b>Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):</b>					
<b>Canales colectores en espina de pescado</b>					
<b>Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):</b>					
<b>Tecnologías de bioingeniería ( Estaca vivas y fajinas vivas)</b>					

b) Diga los valores regulares de los siguientes parámetros.

	<b>Extensión superficial del yacimiento</b>	<b>Extensión superficial de los residuales sólidos</b>	<b>Extensión superficial de los residuales líquidos</b>	<b>Densidad poblacional habitantes</b>
<b>Enmienda orgánica</b>				
<b>Neutralización con CaO(s)</b>				
<b>Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad</b>				
<b>Sistema de tratamiento con Cobertura Seca( Barrera capilar)</b>				
<b>Minería de transferencia</b>				
<b>Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):</b>				
<b>Canales colectores en espina de pescado</b>				
<b>Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):</b>				
<b>Tecnologías de bioingeniería ( Estaca vivas y fajinas vivas)</b>				

## **Apéndice B**

**Tabla 4. Principales técnicas empleadas en la rehabilitación de yacimientos polimetálicos a escala internacional.**

Técnicas	Variables minero ambientales
1. Enmienda orgánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Especies de fauna</li> <li>✓ Usos del suelo</li> <li>✓ Cantidad de depósitos y escombreras</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> </ul>
2. Neutralización con CaO(s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Cantidad de drenajes de minas.</li> <li>✓ Cantidad de drenajes secundarios.</li> <li>✓ Calidad de las aguas superficiales.</li> <li>✓ pH</li> <li>✓ Conductividad eléctrica</li> <li>✓ Presencia o no de vida acuática.</li> <li>✓ Composición mineralógica del estéril y mineral</li> </ul>
3. Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (Successive Alkalinity Producing Systems, SAP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Cantidad y calidad de los drenajes de minas</li> <li>✓ Cantidad de drenajes secundarios</li> <li>✓ Calidad de las aguas superficiales</li> <li>✓ Tipos de acuíferos</li> <li>✓ Calidad de las aguas subterráneas</li> <li>✓ Cantidad de pozos de agua</li> <li>✓ Presencia o no de vida acuática</li> <li>✓ pH</li> <li>✓ Conductividad eléctrica</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Distribución de la población</li> </ul>
4. Sistema de tratamiento con Cobertura Seca( Barrera capilar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Cantidad de depósitos y escombrera</li> <li>✓ Periodo de lluvias</li> <li>✓ Calidad visual del paisaje</li> <li>✓ Costo de la rehabilitación</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usos del suelo</li> </ul>
5. Minería de transferencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Propiedades físico mecánicas de las rocas</li> <li>✓ Altura y ángulo del talud</li> <li>✓ Cantidad de frentes de canteras</li> <li>✓ Calidad visual</li> </ul>
6. Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial):	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Propiedades físico mecánicas de las rocas</li> <li>✓ Altura y ángulo del talud</li> <li>✓ Cantidad de frentes de canteras</li> <li>✓ Calidad del agua superficial</li> <li>✓ Periodo de lluvias</li> <li>✓ Cantidad de frentes de canteras</li> <li>✓ Propiedades físico mecánicas de las rocas.</li> </ul>
7. Canales colectores en espina de pescado	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Propiedades físico mecánicas de las rocas</li> <li>✓ Altura y ángulo del talud</li> <li>✓ Cantidad de frentes de cantera</li> </ul>
8. Tanques Reactivos (Limestone Diversión Wells):	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimiento</li> <li>✓ Cantidad y calidad de los drenajes de minas</li> <li>✓ Cantidad de drenajes secundarios</li> <li>✓ Calidad de las aguas superficiales</li> <li>✓ Tipos de acuíferos</li> <li>✓ Calidad de las aguas subterráneas</li> <li>✓ Cantidad de pozos de agua</li> <li>✓ Presencia o no de vida acuática</li> <li>✓ pH</li> <li>✓ Conductividad eléctrica</li> <li>✓ Composición química mineralógica del estéril y el mineral</li> <li>✓ Distribución de la población</li> </ul>
9. Tecnologías de bioingeniería ( Estaca vivas y fajinas vivas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método de explotación</li> <li>✓ Tipo de yacimientos</li> <li>✓ Calidad visual del paisaje</li> <li>✓ Especies de flora</li> <li>✓ Periodo de lluvias</li> <li>✓ Ángulo y altura del talud</li> </ul>

### Apéndice C

Procedimiento para la rehabilitación minero ambiental en yacimientos Piríticos Polimetálicos de Pinar Del Río.

