

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA**

**UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO**

**MAESTRIA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE  
RECIRCULACIÓN DE AGUA PARA MÁQUINA DE PERFORACIÓN  
EN PROYECTO DE EXPLORACIÓN MINERA”**

**TESIS**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES**

**PRESENTA:**

**ING. MARTIN ANTONIO QUINTERO COTA**

**HERMOSILLO, SONORA.**

**OCTUBRE, 2019.**

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA**

**UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO**

**MAESTRIA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLE**

**T E S I S**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN  
DE AGUA PARA MÁQUINA DE PERFORACIÓN EN PROYECTO DE  
EXPLORACIÓN MINERA**

**COMITÉ REVISOR**

**Presidente**



---

**Dr. Jesús Manuel Quiroz Castillo**


**Secretario**



---

**Dr. Daniel Morales Romero**

**Vocal**



---

**Dra. Mabeth Burgos Hernández**

**Hermosillo, Sonora.**

**Octubre, 2019.**

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios por abrir las puertas necesarias para poder realizar este posgrado tan específico.

A todo el personal involucrado de la empresa **Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V.** especialmente al Gerente General **Ing. Rafael Gutiérrez Medina**, por impulsar, apoyar y permitir la realización de este proyecto y por confiar en mí para llevarlo a cabo, sin su apoyo no hubiera sido posible este trabajo.

Al Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Autónoma Nacional de México con sede en Ensenada, Baja California, por permitirme hacer todas las pruebas de laboratorio en sus instalaciones durante las 2 estancias realizadas en el 2018. Agradecimiento especial al Dr. Sergio Andrés Águila Puentes, Dr. José Manuel Romo Herrera, Dra. Karina del Carmen Lugo Ibarra y a la M.I. Erica Lugo Ibarra por todo su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A los maestros de la Universidad Estatal de Sonora que forman parte de este posgrado, por siempre exigir lo mejor de sus estudiantes. A mis compañeros Ana, Daniel y Alan por el tiempo compartido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por aceptarme como becario en este posgrado.

Al Dr. Jesús Manuel Quiroz Castillo, por haber creído en el proyecto, sus aportaciones y revisiones. Al Dr. Daniel Morales Romero y Dra. Mabeth Burgos Hernández, por sus aportaciones y formar parte de mi comité revisor.

**Dedicado a mis padres Liliana y Martín, por su amor y apoyo incondicional, por su impulso a superarme y dar lo mejor de mí día a día...**

## Contenido

Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	9
Resumen	10
Abstract	12
Introducción	13
Capítulo 1: Planteamiento del Problema	16
1.1 Problema de estudio	16
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo General	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Justificación.	20
Capítulo 2: Marco Teórico	24
2.1 Antecedentes	24
2.1.1 Inicios de la minería	24
2.1.2 Etapas del proceso minero	24
2.1.3 Producción minera de México	26
2.1.4 Relaciones comunitarias de la minería	28
2.1.5 Sonora como estado minero	28
2.2 Uso del agua en Minería	31
2.2.1 Relaciones comunitarias y el desarrollo que brinda la minería	32
2.2.2 Consumo de agua en el proceso minero	33
2.3 Geología en minas	34
2.3.1 Métodos de exploración minera	35

2.3.2 Perforación con Diamante	37
2.3.2.1 Fluidos de perforación	38
2.4 Sistemas de recirculación de agua	41
2.4.3 Calidad del agua en el proceso	42
<b>Capítulo 3: Metodología</b>	<b>44</b>
3.1 Descripción del área de estudio	44
3.2 Hipótesis	46
3.3 Metodología desarrollada	46
3.3.1 Diseño e implementación del sistema de recirculación	46
3.3.1.1 Definición de capacidad de la tina de remoción de sólidos	46
3.3.1.2 Definir rutas de flujo del agua	47
3.3.1.3 Determinar equipo de bombeo para succión y mezclado de agua	48
3.3.2 Obtención de muestras de agua	49
3.3.3 Pruebas de laboratorio	49
<b>Capítulo 4: Resultados</b>	<b>53</b>
4.1 Construcción del prototipo	53
4.2 Implementar sistema en proyecto de perforación	54
4.3 Resultados de barrenos de prueba	59
4.3.1 Barreno 1	59
4.3.2 Barreno 2	60
<b>Capítulo 5: Análisis de Resultados</b>	<b>61</b>
5.1 Consumo de agua	61
5.1.2 Comparación de consumo de agua con un sistema patentado	62

5.1.3 Comparación de costos	63
5.2 Remoción de sólidos suspendidos	64
5.2.1 Remoción de sólidos suspendidos con sistema de recirculación propio	64
5.2.2 Remoción de sólidos suspendidos con sistema de recirculación patentado	65
5.3 Indicadores de Ecoeficiencia	66
5.3.1 Indicador de Ecoeficiencia en BP1	68
5.3.2 Indicador de Ecoeficiencia en BP2	68
5.3.3 Indicador de Ecoeficiencia en BSRP	69
5.3.4 Indicador de Ecoeficiencia en P11	70
5.4 Resumen de Indicadores de Ecoeficiencia	71
Capítulo 6. Conclusiones	72
Recomendaciones	74
Bibliografía	75
ANEXO 1. BITÁCORA DE BARRENO 1	79
ANEXO 2. BITÁCORA DE CONSUMO BARRENO 2	80
ANEXO 3. BITÁCORA DE CONSUMO BARRENO 3 (USANDO SISTEMA DE RECIRCULACIÓN PATENTADO)	81

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Participación en la inversión global en exploración minera en metales no ferrosos por países en 2015.....	13
<b>Figura 2.</b> Disponibilidad y distribución de agua en el mundo.....	14
<b>Figura 3.</b> Gráfica comparativa del crecimiento de la población mexicana a través de los años.....	16
<b>Figura 4.</b> Núcleo de roca extraído por perforación a diamante. Fuente: Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V. ....	18
<b>Figura 5.</b> Presupuesto de Exploración en América Latina por país en 2017.....	20
<b>Figura 6.</b> Consumo de agua en proyecto de perforación minera.....	21
<b>Figura 7.</b> Distribución de las tierras secas en México.....	22
<b>Figura 8.</b> Distribución por países de las empresas exploradoras presentes en Sonora.....	30
<b>Figura 9.</b> Broca y Rima para perforación a diamante. ....	37
<b>Figura 10.</b> Canaleta para medir núcleo de roca. ....	38
<b>Figura 11.</b> Diferentes tipos de lodos de perforación.....	39
<b>Figura 12.</b> Secciones de pérdida de circulación hacia la superficie.....	40
<b>Figura 13.</b> Unidades Mineras en Producción en el Estado de Sonora (Sonora, 2019).....	45
<b>Figura 14.</b> Diseño de Tina de Remoción de Sólidos.....	47
<b>Figura 15.</b> Motobomba Honda WL20-MFX de 2 pulgadas, motor de gasolina. ....	48
<b>Figura 16.</b> Muestras tomadas en el sitio de perforación.....	49
<b>Figura 17.</b> Calibración del potenciómetro.....	50
<b>Figura 18.</b> Agua virgen, agua de retorno y agua tratada.....	51
<b>Figura 19.</b> Muestras en placas calefactoras.....	51
<b>Figura 20.</b> Recipientes con sólidos después del secado. ....	52
<b>Figura 21.</b> Diferentes etapas de construcción del sistema de recirculación de agua. ....	53
<b>Figura 22.</b> Prototipo instalado en área de barrenación.....	54
<b>Figura 23.</b> Pileta de agua virgen junto a la pipa de acarreo que la abastece. ....	55
<b>Figura 24.</b> Agua retornando hacia la superficie y siendo dirigida hacia los cárcamos.....	56
<b>Figura 25.</b> Alimentación de tina de remoción de sólidos.....	57
<b>Figura 26.</b> Sólidos floculados flotando en la superficie.....	57
<b>Figura 27.</b> Remoción de sólidos encapsulados.....	58
<b>Figura 28.</b> Consumo de agua en el primer pozo de perforación. ....	59
<b>Figura 29.</b> Consumo de agua en el segundo pozo de perforación. ....	60
<b>Figura 30.</b> Comparación de resultados con un proyecto sin sistema de recirculación utilizado. ....	61
<b>Figura 31.</b> Comparación de consumo entre barrenos (BP1, BP2, BSRP, P11).....	63
<b>Figura 32.</b> Comparación de Indicadores de Ecoeficiencia.....	71



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público. ....	17
<b>Tabla 2.</b> Costo promedio de agua en el proceso de perforación en 1 máquina.....	23
<b>Tabla 3.</b> Fases de vida de una mina Fuente: Modificado de Hartman (1987) .....	25
<b>Tabla 4.</b> Participación de México en la producción minera en el mundo Fuente: Información tomada del informe anual 2018 de la Cámara Minera Mexicana.....	27
<b>Tabla 5.</b> Participación en el volumen y valor de la producción minera estatal 2016 .....	29
<b>Tabla 6.</b> Usos de Agua en Operaciones de Mina y en Exploración Minera Fuente: Modificada de Water in Mining and Industry, 2011. *Los datos de la columna exploración son con información interna obtenida de esta investigación* .....	32
<b>Tabla 7.</b> Consumo de agua de las “Hard Rock Mines” .....	34
<b>Tabla 8.</b> Comparación de los diferentes métodos de perforación para exploración. Fuente. Traducido de "Geological Methods in Mineral Exploration and Mining", 2010. ....	36
<b>Tabla 9.</b> Consumo de agua de acuerdo al diámetro de perforación .....	47
<b>Tabla 10.</b> Comparación de costos entre los sistemas de recirculación utilizados..	64
<b>Tabla 11.</b> Resultados de pruebas de laboratorio de remoción de sólidos suspendidos del sistema diseñado en este proyecto. ....	65
<b>Tabla 12.</b> Resultados de pruebas de laboratorio de remoción de sólidos suspendidos del sistema de recirculación patentado.....	66

## Resumen

Hoy en día tener acceso a agua potable en algunas zonas puede llegar a ser muy complicado, no solamente por marginación geográfica sino por la creciente demanda de este recurso ante una población mundial que aumenta considerablemente.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de recirculación de agua para proyectos de perforación minera exploratoria, que permita maximizar la producción y el aprovechamiento de recursos. Las etapas de planeación, diseño y construcción del prototipo se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V. localizada en la ciudad de Hermosillo. Las pruebas del prototipo se realizaron en un proyecto de perforación cerca de Caborca, Sonora, para una importante empresa minera del mundo. Así mismo, las actividades relacionadas con la etapa de análisis de las muestras se realizaron en las instalaciones del Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN), en la ciudad de Ensenada, Baja California.

Utilizando la metodología de la UNCTAD, fue posible comparar diferentes sistemas de aprovechamiento de agua en el proceso productivo de la compañía Itzcoatl, Drilling and Services, S.A. de C.V., se obtuvo un Indicador de Ecoeficiencia que relaciona los aspectos ambientales con los factores económicos, confirmando que el proceso que mostró una mayor ecoeficiencia fue el diseñado y construido en el desarrollo de este trabajo.

Los problemas ambientales actuales representan un desafío para la continuidad de los procesos productivos, de este trabajo se concluye que la utilización del sistema de recirculación de agua propuesto presenta una oportunidad a las empresas de perforación minera para que mantengan los niveles de producción mientras se

disminuye el consumo de recursos, conservando su competitividad y mejorando sus indicadores de desempeño ambiental.

## **Abstract**

Nowadays, having access to water in some areas can be very complicated, not only because of geographical marginalization but also do to the growing demand for this resource in the face of a world population that is increasing considerably.

The objective of this work was to develop a water recirculation system for mining exploration drilling projects, maximizing production and use of resources. Planning, design and construction were developed at Itzcoatl Drilling and Services facilities, in Hermosillo, Sonora. The prototype tests were done at a drilling project near Caborca, Sonora for an important global mining company. The analysis of the samples were done at the facilities of the Center for Nanosciences and Nanotechnology (CNyN), in the city of Ensenada, Baja California.

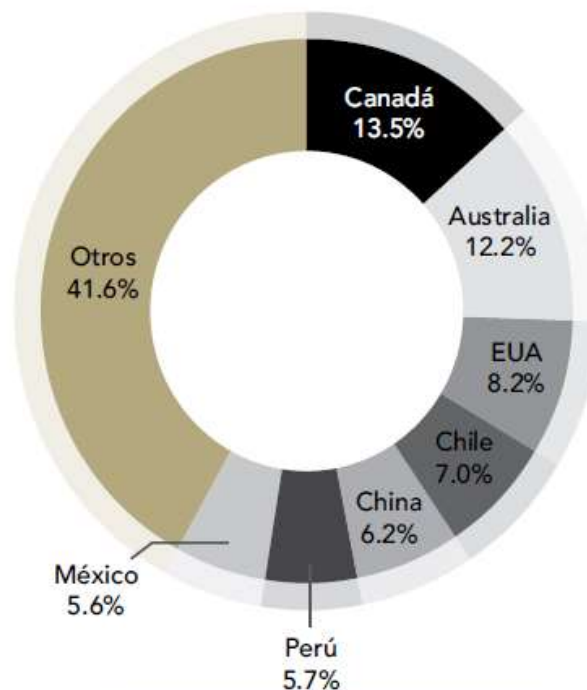
Using the UNCTAD methodology, it was possible to compare different water recirculation systems in the drilling process, an Eco-Efficiency Indicator that relates environmental aspects with economic factors was obtained, confirming that the process that showed greater eco-efficiency was the one designed and built in this work.

The current environmental problems represent a challenge for the continuity of the productive processes, from this work it is concluded that the use of the proposed water recirculation system presents an opportunity for mining drilling companies to maintain production levels while decreasing the resource consumption, maintaining competitiveness and improving their environmental performance indicators.

## Introducción

La minería es un sector económico clave en el desarrollo económico y tecnológico de México, sin duda seguirá impulsando el crecimiento del país. En términos económicos en el 2015 representó el 8.8% del producto interno bruto (PIB) industrial y el 3% del nacional y 3.9 % si se considera la minería ampliada. En ese mismo año México representó el 5.6 % de la inversión global en exploración minera para minerales no ferrosos que representa el 95% del presupuesto Mundial (Figura 1), siendo el 3er lugar en América Latina (CMM, Informe Anual 2016, 2016).

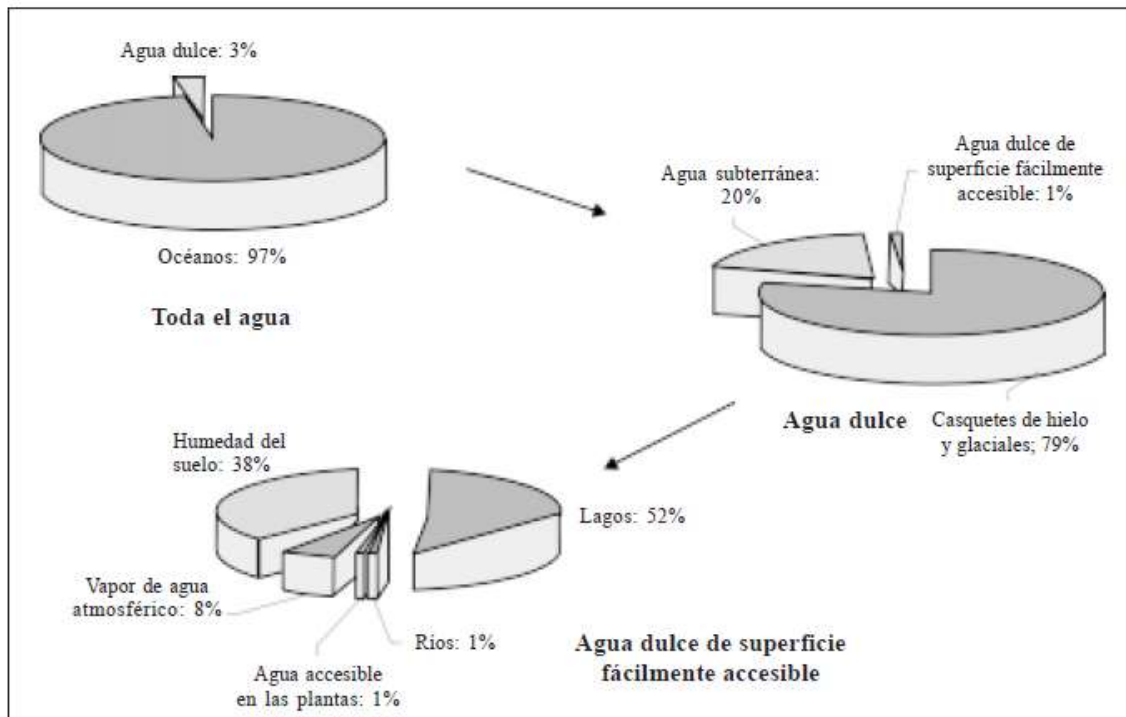
**PARTICIPACIÓN EN LA INVERSIÓN GLOBAL  
EN EXPLORACIÓN MINERA EN METALES  
NO FERROSOS POR PAÍSES EN 2015**  
(8,771 Millones de dólares)



**Figura 1.** Participación en la inversión global en exploración minera en metales no ferrosos por países en 2015

**Fuente:** Cámara Minera de México, 2016

Hoy en día tener acceso a agua potable en algunas zonas puede llegar a ser muy complicado, no solamente por marginación geográfica sino por la creciente demanda de este recurso ante una población mundial que aumenta considerablemente. La escasez y mal uso del agua sin duda es un problema que enfrentamos día a día (Agudelo C., 2005). Se sabe que solamente el 3% del agua en la tierra es dulce y solamente tenemos acceso a 1% del total, pues este se encuentra en ríos, lagos y pozos cerca de la superficie (Figura 2). En minería este problema se agrava un poco, ya que las minas son el único sector industrial que no elige donde colocarse, por lo tanto, es común encontrarlas en lugares muy marginados y alejados de las ciudades. Siendo así un problema que tiene en general el sector minero en la administración del uso de agua.



**Figura 2.** Disponibilidad y distribución de agua en el mundo  
**Fuente:** Lean y Hinrichsen, 1994.

Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V. es una empresa 100% mexicana que se dedica a la perforación para exploración minera. Inició operaciones en proyectos de barrenación a partir del 2012, cuenta con la capacidad de brindar servicio en todo el territorio Nacional, en caso de ser requerida.

Con el objetivo de satisfacer las necesidades de los corporativos mineros en las áreas normativas de seguridad, salud y medio ambiente, siguiendo además la tendencia global de reducir el impacto ambiental en los procesos industriales y buscando innovar sus propios procesos, la empresa crea el departamento de Desarrollo Sustentable en el 2016.

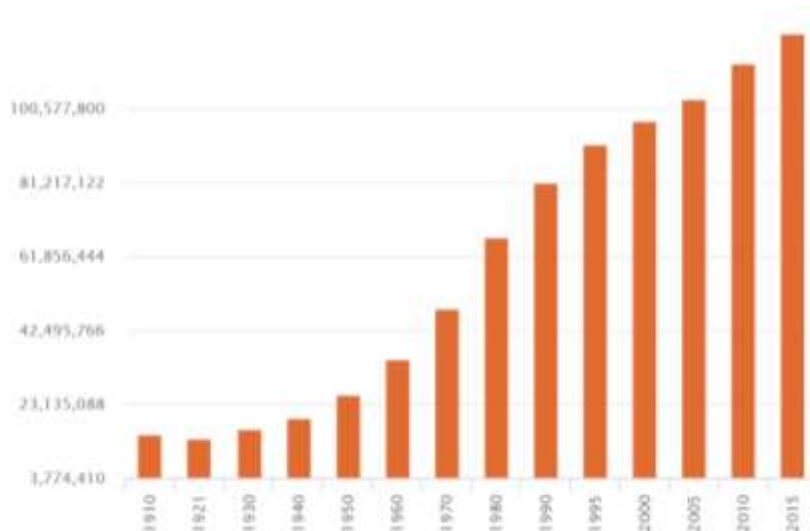
El objetivo del presente trabajo es implementar un sistema de recirculación de agua que permita eliminar los sólidos de una manera práctica y así reutilizar el agua del proceso de perforación, el sistema debe ser de bajo costo, manteniendo la calidad debida para no entorpecer la operación y cuidando el ambiente.

# Capítulo 1: Planteamiento del Problema

## 1.1 Problema de estudio

A nivel mundial el acceso al agua ha marcado la diferencia en las naciones que han tenido desarrollo tanto económico y tecnológico, además de tener un papel fundamental para la vida debido a sus propiedades biológicas. El agua es y ha sido a lo largo de los años un símbolo de poder (Monforte García & Cantú Martínez , 2009).

En el siglo XXI la población mundial se triplicó y la extracción de agua se sextuplicó lo que agrava el problema de abastecimiento de agua (CNA, 2014). En México la población censada al 2015 incrementó casi un 20% con respecto al número de habitantes que había en el año 2000 (Figura 3), llegando hasta 119, 938,473 (INEGI, 2018).



**Figura 3.** Gráfica comparativa del crecimiento de la población mexicana a través de los años  
**Fuente:** INEGI



El aumento en el número de habitantes en un país requiere también aumentar la cantidad de recursos, tales como el agua, para sostener a la población. En la siguiente tabla (Tabla 1) podemos ver los porcentajes de los países con mayor extracción de agua y sus diferentes usos; México figura en el noveno lugar.

**Tabla 1.** Países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público.

**Fuente:** Modificado de CONAGUA, 2014.

No.	País	Extracción total de agua (miles de millones de m <sup>3</sup> /año)	Uso agrícola (%)	Uso industrial (%)	Uso abastecimiento público (%)
1	India	761.00	90.4	2.2	7.4
2	China	554.10	64.6	23.2	12.12
3	Estados Unidos de América	478.40	40.2	46.1	13.7
4	Pakistán	183.50	94	0.8	5.3
5	Indonesia	113.30	81.9	6.5	11.6
6	República Islámica del Irán	93.3	92.2	1.2	6.6
7	Japón	90.4	63.1	17.6	19.3
8	Vietnam	82.03	94.8	3.7	1.5
9	<b>México</b>	<b>81.65</b>	<b>75.7</b>	<b>9.6</b>	<b>14.6</b>
10	Filipinas	81.56	82.2	10.1	7.6
11	Brasil	74.83	60	17	23
12	Egipto	68.30	86.4	5.9	7.8

Uno de los usos industriales del agua en México le pertenece al sector minero. El proceso minero consta de 5 etapas principales: 1. Prospección 2. Exploración 3. Desarrollo y preparación 4. Explotación-beneficio y 5. La remediación y el cierre (SE, 2019). Es precisamente en la etapa de exploración donde se encuentran los yacimientos de mineral y se entra a una etapa de evaluación para determinar si vale la pena (económicamente) explotar la zona.

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo perforaciones para exploración, la decisión de elegir una depende de muchos factores como el precio por metro perforado, el tipo de yacimiento geológico y la forma en la que se obtienen las muestras. Una de ellas, muy utilizada en las actividades de exploración, es la “perforación a diamante”, con esta técnica la muestra se corta directamente del subsuelo y forma un cilindro de roca (Figura 4) que es recuperado por un tubo interior dentro del barril de perforación (Moon, Whateley, & Evans, 2006).



**Figura 4.** Núcleo de roca extraído por perforación a diamante.  
Fuente: Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V.

Actualmente el uso de máquinas de perforación “a diamante” para exploración minera implica un gasto considerable de agua dentro del proceso para trabajar, aunque no se tiene una base de datos abierta al público sobre cuantos metros cúbicos se gastan en actividades de perforación, si podemos revisar las especificaciones generales del proceso. En el “Manual Técnico del Perforista” de Diamantina Christencen (2016) se especifica el gasto de agua de una máquina de acuerdo al diámetro de perforación que se está utilizando. El diámetro más común requerido por las empresas es denominado “HO” (88.9 mm de diámetro exterior) y su demanda de agua puede ser entre 39 y 48 litros por minuto, lo que indica que en

una hora se pueden consumir hasta 2,880 litros de agua (Christencen, 2016) y por lo regular este tipo de trabajo es continuo durante 24h.

Los métodos actuales de reutilización de agua usados en exploración minera son muy costosos, en la experiencia de la empresa al adquirirlos y utilizarlos, estos equipos no se adaptan completamente al proceso y de igual forma no dan resultados eficientes, retrasando la operación y sin una obtención de los resultados esperados, por lo que los impactos al medio ambiente llegan a ser irreversibles. En este sentido, la empresa Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V., en busca de generar tecnología propia en actividades de perforación a diamante, se interesa en los sistemas de recirculación de agua. Para lo anterior se necesita diseñar un sistema para la eliminación de sólidos suspendidos del agua de retorno, que reduzca la cantidad de litros de agua virgen por metro barrenado, sin entorpecer la operación. Al mismo tiempo, manteniendo la calidad requerida para ser mezclada con los aditivos y reutilizarse en el proceso, que disminuya el costo operativo y que cumpla con la normatividad de seguridad y medio ambiente, así como los estándares internacionales de gestión ambiental.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema para la separación de sólidos suspendidos del agua de retorno de las actividades de perforación para exploración minera, utilizando sistemas de bombeo, floculantes y mezcladores, para acelerar la separación y obtener agua con la calidad necesaria para reutilizarse sin poner en riesgo el proceso de perforación.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Diseñar e implementar un sistema de recirculación.

- Obtener muestras de agua de retorno del proceso de perforación y caracterizar el pH y la dureza del agua proveniente del retorno de perforación.
- Realizar pruebas para determinar la cantidad de sólidos que el sistema logra separar del agua de retorno.
- Comparar la eficiencia del sistema diseñado con uno ya patentado, en el proyecto minero muestreado.

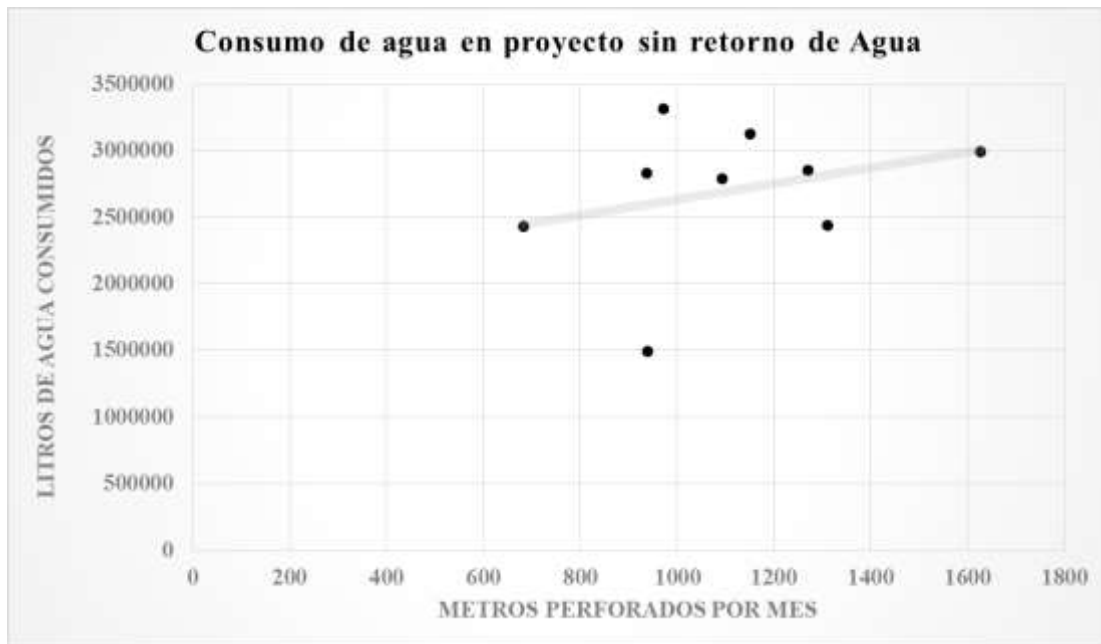
### 1.3 Justificación.

La minería figura entre los principales sectores económicos del país. Hablando de exploración minera, a nivel global durante el 2017, México tuvo el 6% de la inversión total. A nivel Latinoamérica, México es sólo superado por Chile y Perú, ubicándose en el tercer lugar de los países con mayor inversión en exploración minera (Figura 5), (CMM, 2018). Lo que indica que al menos en el mediano plazo se espera que se sigan realizando actividades de exploración en el país.



**Figura 5.** Presupuesto de Exploración en América Latina por país en 2017  
**Fuente:** Cámara Minera de México, informe Anual 2018

En los proyectos de perforación a diamante, dependiendo del terreno donde se esté trabajando, se pueden llegar a utilizar hasta 2,400 litros de agua promedio por metro perforado, especialmente en proyectos donde no se tiene recuperación de agua (Figura 6).



**Figura 6.** Consumo de agua en proyecto de perforación minera

**Fuente:** Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V.

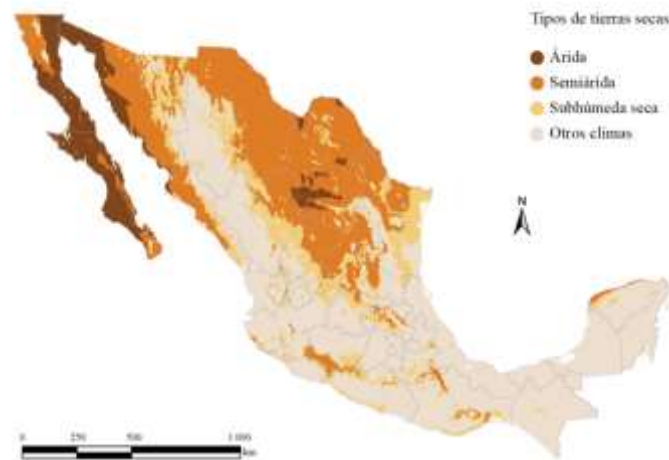
Proyecto realizado en el estado de Chihuahua,

Duración: 10,000 m

Consumo total de agua: 24,250 metros cúbicos

Promedio de consumo por metro perforado: 2,428.5 l/m

Este consumo es poco deseable en la zona norte de México donde el acceso al agua puede representar problemas por ser una zona mayormente semiárida (Figura 7).



**Figura 7.** Distribución de las tierras secas en México  
**Fuente:** SEMARNAT, 2014

Además del acceso al agua, el costo de servicios de acarreo llega a tomar un papel muy importante dentro del proceso, ya que, si bien varía de un lugar a otro el costo de las rentas de maquinaria, podemos obtener un aproximado de lo que representa en la operación en acarreo de agua virgen y los viajes de limpieza de las fosas de agua con sedimentos (Tabla 2).

**Tabla 2.** Costo promedio de agua en el proceso de perforación en 1 máquina.

**Fuente:** Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V.

CONCEPTO	AGUA VIERGEN	AGUA CON ENSOLVE (LIMPIEZA)
<b>Número de viajes semanales</b>	<b>28 viajes</b>	<b>6 viajes</b>
<b>Costo unitario</b>	<b>\$ 1,250.00</b>	<b>\$ 950.00</b>
<b>Costo semanal</b>	<b>\$ 35,000.00</b>	<b>\$ 5,700.00</b>
<b>Costo mensual promedio</b>	<b>\$ 140,000.00</b>	<b>\$ 22,800.00</b>
<b>Total</b>		<b>\$ 162,800.00</b>

Actualmente existen sistemas patentados para recircular agua en proyectos de exploración que utilizan centrifugas decantadoras como la “Solid Removal Unit (SRU)” de “Australian Mud Company (AMC)” pero su costo es alto, incluso no están a la venta, los equipos solamente se encuentran disponibles a la renta, dicha renta puede alcanzar los 10 mil dólares al mes, además funcionan a base de combustible, que encarece aún más este precio. Es por ello que se necesita diseñar e implementar un sistema propio, económico y eficiente para los proyectos de perforación para exploración, que disminuya el consumo de agua virgen debido a los escasez y creciente demanda de este recurso indispensable en el sector minero, utilizando métodos prácticos, seguros y amigables con el ambiente y fomentar la producción sustentable en las actividades de exploración minera.

## **Capítulo 2: Marco Teórico**

### **2.1 Antecedentes**

#### **2.1.1 Inicios de la minería**

La minería forma parte de los primeros trabajos de desarrollo de la humanidad, hay registros de hace más de 450 mil años con evidencias de la fabricación de armas con utensilios metálicos (Kennedy, 1990). Cabe señalar que los primeros usos registrados con metales fueron decorativos, en vez de usos utilitarios, debido a sus características consideradas inusuales en esa época (Raymond, 1986). Podemos decir que desde la prehistoria los humanos han sido atraídos por los metales, que fueron conseguidos probablemente lavando grava de río (Hartman, 1987).

Considerando lo anterior, resalta que, a pesar de utilizar técnicas muy rudimentarias, en comparación con las que tenemos actualmente, se tuvo que haber tenido un proceso de exploración para que se pudiera encontrar mineral.

#### **2.1.2 Etapas del proceso minero**

Como se ha mencionado anteriormente, las etapas del proceso de minería, según Hartman, antes de llegar a la etapa de explotación y beneficio pueden pasar más de 10 años (Tabla 3), lo que hace delicado y bastante preciso el encontrar un yacimiento de mineral.

Con el paso de los años la minería ha tenido una evolución significativa, así como una caída económica en el sector. El período de 1982 a 1986 marcó una etapa de desarrollo en la minería a nivel global, los precios de los metales estuvieron bajos y eso originó una revolución tecnológica para que se optimizara el proceso minero, incluyendo la mejor utilización de los equipos de producción y también de las



relaciones laborales entre los obreros y los patronos (Bohnet, Winkle , & Edmiston, 1987).

**Tabla 3** Fases de vida de una mina  
Fuente: Modificado de Hartman (1987)

<i>Fase</i>	<b>Procedimiento</b>	<b>Intervalo de tiempo en años</b>	<b>Costo por tonelada</b>
<i>Prospección</i>	Búsqueda de menas	1 a 3	2 a 5 centavos (US)
	Métodos de prospección: Directo - física, geología. Indirecto - geofísica, geoquímica.		
	Localización de lugares favorables: Mapas, publicaciones, minas antiguas y presentes.		
	Aire: Fotos aéreas, imágenes de satélite, métodos geofísicos.		
	Superficie: Métodos geofísicos y geológicos. Anomalía - Análisis - Evaluación.		
<i>Exploración</i>	Dimensión y valor del depósito mineral	2 a 5	1 centavo (US)
	Muestreo: Excavación, roza, sondeo.		
	Assay test - Cálculo de grado.		
	Evaluación: Hoskold fórmula, discount method, estudio de factibilidad.  valor actual = rendimiento - costos		
<i>Desarrollo</i>	Depósito mineral abierto para la producción	2 a 5	25 centavos a 5 dólares (US)
	1 Derechos de minería		
	2 Estudio del impacto de minería al medio ambiente		
	3 Infraestructura		
	4 Planta		
5 Explotación			
<i>Explotación</i>	Producción de las menas	10 a 30	2 a 100 dólares (US)
	Factores, que influyen en la selección del método aplicado son: geología, geografía, economía, medio ambiente, aspecto social, seguridad.  Métodos mineros son entre otros: explotación a cielo abierto, "open pit", "open cast"; explotación a grandes cortes, a cortes con hundimiento.		

### **2.1.3 Producción minera de México**

En México, se ha documentado la importancia de la minería en términos económicos y de desarrollo para el país, el cual figura entre los principales productores de oro en el mundo y es el primer productor de plata, así también forma parte de los principales productores de diversos minerales (Tabla 4). En el 2010 el sector minero tomó gran importancia al colocar a México en el mapa mundial de los principales países con actividades mineras. En el 2012 América Latina se posicionó como la mejor región para invertir en exploración minera y ese mismo año México fue el principal país, dejando atrás a Chile y Perú (Góngora Pérez, 2013), aunque años más tarde Chile volviera a tomar el liderato del grupo.

En el 2013 la minería sufrió una caída importante, debido a la baja de los precios de los metales, lo que se traduce en una reducción en la inversión y en la utilidad de las empresas mineras. A su vez en México se aprobaron nuevas leyes fiscales que afectaron la atracción de inversión, debido a que los gastos realizados en la etapa de exploración no son deducibles en el año en el que se realizan, el nuevo esquema se aplicó a partir del 2014 (CMM, Informe Anual 2014, 2014), esto sumado con el bajo precio de los metales inició un panorama difícil para el sector que ha fluctuado hasta el día de hoy.

En México la minería ha presentado incrementos considerables en su inversión, no obstante, no se ha podido recuperar en comparación con los montos registrados en el 2012. Durante el 2017 se invirtieron 4 mil 302 millones de dólares, aumentando un 14.7 % con respecto al 2016, pero separados un 46.5 % de los 8 mil 43 millones

de dólares invertidos en el 2012 (CMM, Informe Anual 2018, 2018). Aun así, este sector sigue siendo un pilar en el desarrollo económico y tecnológico del país.

**Tabla 4** Participación de México en la producción minera en el mundo  
**Fuente:** Información tomada del informe anual 2018 de la Cámara Minera Mexicana

<i>Mineral</i>	<b>Porcentaje de Producción</b>	<b>Lugar a Nivel Mundial</b>
<i>Plata</i>	23.00%	1° Lugar
<i>Sulfato de sodio</i>	4.10%	3° Lugar
<i>Zinc</i>	5.11%	6° Lugar
<i>Cobre</i>	3.83%	7° Lugar
<i>Yeso</i>	2.08%	9° Lugar
<i>Azufre</i>	1.45%	14° Lugar
<i>Fluorita</i>	16.50%	2° Lugar
<i>Wollastonita</i>	10.26%	4° Lugar
<i>Sulfato de magnesio</i>	4.00%	6° Lugar
<i>Barita</i>	1.81%	8° Lugar
<i>Manganeso</i>	1.38%	11° Lugar
<i>Fosforita</i>	0.76%	14° Lugar
<i>Celestina</i>	28.22%	2° Lugar
<i>Molibdeno</i>	4.14%	5° Lugar
<i>Cadmio</i>	4.78%	7° Lugar
<i>Diatomita</i>	3.00%	8° Lugar
<i>Caolín</i>	0.86%	11° Lugar
<i>Arena sílica</i>	81.00%	14° Lugar
<i>Bismuto</i>	3.86%	3° Lugar
<i>Plomo</i>	5.05%	5° Lugar
<i>Sal</i>	3.21%	7° Lugar
<i>Oro</i>	4.02%	9° Lugar
<i>Grafito</i>	0.33%	13° Lugar

#### **2.1.4 Relaciones comunitarias de la minería**

En el ámbito social y ambiental la minería es constantemente atacada por diferentes sectores, pues el giro no está exento de problemas con la comunidad por la naturaleza de sus actividades. Desde extremistas ambientales quejándose del impacto negativo en la flora y fauna de las regiones, hasta las comunidades aledañas a los proyectos mineros que se aprovechan de la situación para recibir un beneficio.

Otro grupo crítico importante del sector es el de los académicos que clasifican a las actividades mineras como un robo por parte de las empresas extranjeras (y Nacionales), argumentando que el estado mexicano permite la violación del artículo 28 de la constitución mexicana, ya que consideran que las actividades mineras no benefician a la Nación ni a las generaciones futuras, puesto que las contribuciones fiscales de las empresas extranjeras y Nacionales no van en función de la cantidad de mineral que extraen, sino sólo en el pago de derechos de las tierras para trabajar (Cárdenas, 2013).

Se puede pensar que esta mala fama que se crea de los proyectos mineros disminuye la popularidad de este importante giro industrial. Sin embargo, las empresas mineras han estado trabajando para crear una cultura de trabajo diferente, hacia un desarrollo sustentable, creando alianzas (Clústers) para realizar esfuerzos por impactar negativamente menos, con inversión para crear tecnología que optimice aún más los procesos de producción y mejorando los planes de capacitación en materia ambiental, motivando el uso de energías limpias, buen uso de agua y correcto manejo de residuos industriales y peligrosos.

#### **2.1.5 Sonora como estado minero**

Sonora es considerado como un estado minero debido a sus características y condiciones que han dado lugar (en términos geológicos) a que tenga los principales

yacimientos de oro, cobre y molibdeno del país. Sin duda Sonora ha tenido la actividad minera más importante del país por los volúmenes de producción anuales. El estado es fundamental para mantener a México dentro de los principales productores mundiales de mineral (Tabla 5).

A principios de la década de 1990 el estado tuvo un crecimiento notorio en el desarrollo de exploración minera, en esta década fue cuando llegaron principalmente empresas canadienses y estadounidenses para asentarse y establecerse en la región con el objetivo de explotar estos recursos. Actualmente se están realizando trabajos de exploración en diferentes partes del estado, con empresas mexicanas e internacionales de acuerdo al Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017).

Durante el 2017 el SGM contabilizó 22 minas de minerales metálicos y 24 de no metálicos y bancos de material como las principales del estado, sin embargo, se tienen en operación mayor cantidad de proyectos mineros, concesiones pendientes de liberar y proyectos en exploración en etapa avanzada (SGM, 2017).

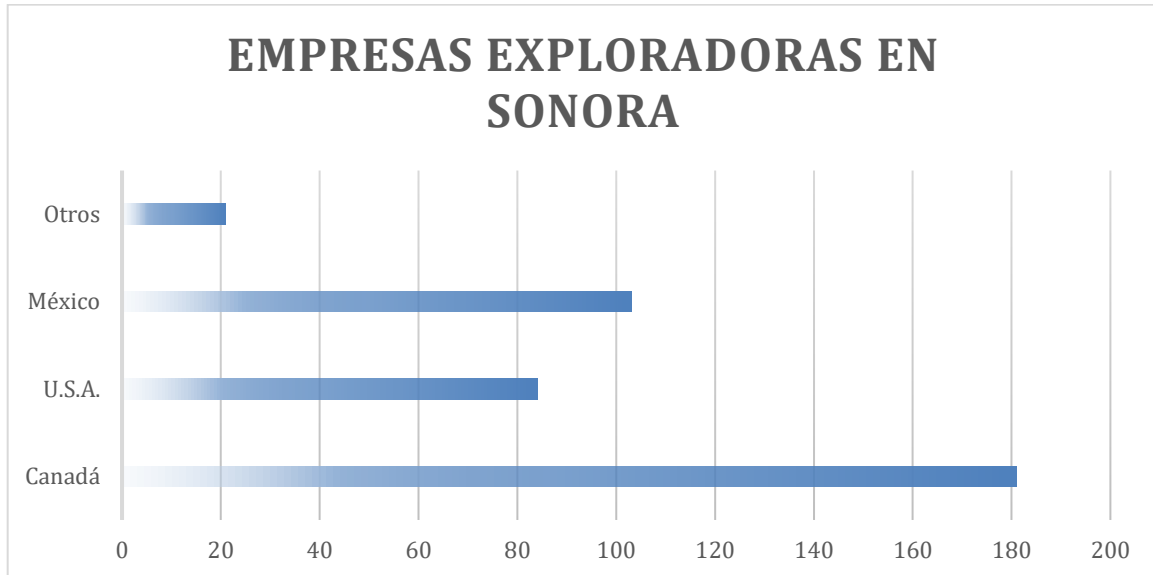
**Tabla 5.** Participación en el volumen y valor de la producción minera estatal 2016

Fuente: Modificado de Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2015 Edición 2016 S.G.M.

<i>Productos</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>
<i>Metálicos</i>					
<i>Oro (kg)</i>	30,003.00	35,364.00	34,936.00	42,591.50	47,412.30
<i>Plata (kg)</i>	356,393.00	667,150.00	359,403.00	363,892.00	428,242.00
<i>Aluminio</i>	96,000.00	-	-	-	96,000.00
<i>Cobre</i>	389,302.00	369,006.00	403,860.00	483,510.00	655,807.00
<i>Fierro</i>	1,308,916.00	1,184,879.00	1,667,352.00	1,449,000.00	23.00
<i>Molibdeno</i>	11,366.00	12,562.00	14,370.00	11,327.00	11,896.00
<i>Selenio</i>	95.00	132.00	120.00	99.00	121.00
<i>No Metálicos</i>					
<i>Agregados</i>	97,622.00	929,280.00	13,490,959.00	13,133,753.30	13,825,924.19
<i>Pétreos</i>					
<i>Arcillas</i>	320,250.00	272,213.00	184,725.00	345,000.00	353,595.68

<i>Arena 1/</i>	1,548,600.00	1,316,310.00	1,428,540.00	2,668,000.00	2,734,473.23
<i>Barita</i>	-	384.00	13,033.00	87,000.00	28,310.00
<i>Calcita 2/</i>	116,486.00	99,013.00	-	-	195,485.00
<i>Caliza</i>	1,365,660.00	1,160,811.00	985,200.00	1,840,000.00	2,288,789.61
<i>Carbón</i>	-	-	-	-	5,001.00
<i>Grafito</i>	7,520.00	7,024.00	9,160.00	6,524.00	14,200.00
<i>Grava 3/</i>	2,061,240.00	1,752,054.00	2,376,795.00	4,484,375.00	4,549,597.70
<i>Perlita</i>	6,000.00	5,000.00	4,000.00	-	6,000.00
<i>Riolita</i>	-	-	1,209,500.00	137,940.00	155,800.00
<i>Sal</i>	157,778.00	134,111.00	-	28,500.00	214,170.00
<i>Sílice</i>	-	-	-	18,600.00	99,967.00
<i>Wollastonita</i>	55,204.00	57,302.00	54,759.00	57,451.00	63,683.00
<i>Yeso</i>	118,367.00	158,738.00	148,664.00	169,600.00	247,865.23

Al cierre del año 2017 Sonora contaba con más de 380 empresas exploradoras, quienes eran en su mayoría canadienses, seguido de las mexicanas y estadounidenses, entre otros países que comparten la minoría de ellas (Figura 8).



**Figura 8.** Distribución por países de las empresas exploradoras presentes en Sonora  
**Fuente:** Modificado de Informe del SGM, Panorama Minero del Estado de Sonora, 2017

Los datos que se han mostrado reflejan el potencial de Sonora en minería y a pesar de la caída del 2012 año con año el sector se recupera poco a poco y se afianza como uno de los principales puntos estratégicos de desarrollo, generando derrama económica en sectores marginados, así como servicios y educación. Estos beneficios inician desde la etapa de prospección, pues es el inicio de la minería y concluye hasta el cierre de minas.

El presente trabajo se centra en las actividades de perforación para exploración minera, que tienen función en la 2da y 4ta etapa del proceso minero (SE, 2019).

## **2.2 Uso del agua en Minería**

El uso del agua en la industria minera es determinante para llevar a cabo el proceso, las cantidades que se utilizan son considerables, sin embargo, el sector que más agua utiliza en su proceso es la agricultura con el 75.7 % de acuerdo a estadísticas antes mencionadas del INEGI (Tabla 1).

Las minas pueden llegar a utilizar una gran cantidad de agua que obtienen ellas mismas realizando maniobras para sacar la humedad que encuentran en el interior de las minas subterráneas (dewater mines), pues es común que se encuentre agua a medida que se va descendiendo. Así mismo, esta agua puede venir sobrecargada con sales, lo que hace que necesiten un cuidado específico en su calidad para volver a utilizarla. También en ocasiones el agua viene demasiado contaminada, por lo cual se regresa al ambiente al ser complicado el tratamiento necesario para integrarlas al proceso, sin embargo, estas se tratan para posteriormente verterse en ríos (Prosser, Wolf, & Littleboy, 2011).

La lluvia en algunos lugares es una fuente importante de obtención del recurso, pero esto depende de la infraestructura de abastecimiento que tenga la mina y el tipo de suelo que hay, considerando la hidrología del sitio.

El uso de agua favorece el proceso minero ya que es un método efectivo y de bajo costo para transportar materiales y residuos de un lugar a otro, así como también el mezclado de químicos que son esenciales para la obtención de metales o almacenaje de sustancias (Tabla 6).

**Tabla 6.** Usos de Agua en Operaciones de Mina y en Exploración Minera  
**Fuente:** Modificada de Water in Mining and Industry, 2011.  
**\*Los datos de la columna exploración son con información interna obtenida de esta investigación\***

<b>Actividades de Operación en Mina</b>	<b>Actividades de Perforación para Exploración Minera</b>
Transporte de oro y desperdicio de lodos en suspensión	Lubricación y enfriamiento de broca
Separación de minerales mediante procesos químicos	Transporte de sólidos hacia la superficie
Uso de centrífugas para separación física de material	Sistema de enfriamiento de la máquina
sistemas de enfriamiento en generadores de energía	Base para disolver polímeros (aditivos)
Supresión del polvo, tanto durante el procesamiento de minerales como alrededor de transportadores y caminos	Uso doméstico
Lavado de equipo	Lavado de equipo
Deshidratación de minas	Supresión de polvo con riego de caminos

### **2.2.1 Relaciones comunitarias y el desarrollo que brinda la minería**

Es común que el sistema de abastecimiento de agua de las empresas mineras esté separado del de las comunidades vecinas. Las empresas mineras realizan esfuerzos para hacer eficiente su uso del agua, adoptando nuevas tecnologías, mejorando procesos, reutilizando, reciclando y encontrando fuentes alternas de agua (Prosser, Wolf, & Littleboy, 2011) ya que al hacerlo demuestran interés en tener buenas relaciones con la comunidad y el ambiente que los rodea. En Sonora por ejemplo las relaciones con la comunidad son complicadas, pues es normal



encontrarse con comunidades muy marginadas que se dediquen a la ganadería y la agricultura (principalmente) y por las características áridas de la zona (Figura 7) en ocasiones hay disputas por el uso del agua y esta afecta/obliga a las empresas a innovar sus procesos y así mismo de negociar con la comunidad el uso del recurso. Esta negociación permite muchas veces la mejora de las condiciones de los lugares donde se asientan las empresas a trabajar, trayendo escuelas, servicios, pavimentación, trabajo e incluso apoyos a las personas locales.

### **2.2.2 Consumo de agua en el proceso minero**

En EE.UU. se denominan “Hard Rock Mines” a las minas que producen oro o diferentes metales y minerales. De igual forma el consumo de agua en sus actividades es medido con un indicador que contabiliza los galones de agua utilizados en el proceso dividido entre las toneladas de oro o metal que se producen.

En la Tabla 7 se puede observar el promedio de consumo de agua en las minas de metales y minerales. El uso de agua está muy relacionado con el consumo energético de las unidades mineras, esto radica en el trabajo que se realiza para mover el agua, o las soluciones con mineral mediante equipos de bombeo, de un lugar a otro. El agua se puede asociar principalmente en tres áreas del proceso: Producción, el procesamiento posterior y transporte de productos (Mavis, 2003).

**Tabla 7** Consumo de agua de las “Hard Rock Mines”

Fuente: Modificada de (Mavis, 2003).

Operación	Uso bruto del agua (galones por tonelada)	Uso neto del agua (galones por tonelada)	Comentarios
Perforación (no exploratoria)	-	2 - 5 gpm/pozo	El uso de agua por tonelada varía dependiendo del diámetro perforado, espacio, orientación, profundidad, tipo de explosivo
Trituración (control del polvo)	-	1 - 6 nominal	
Cribado	30 - 250	-	Uso bruto - en los sólidos y agua
Molienda semi autógena	475 - 700 nominal	125 - 200 nominal	Uso neto - para sólidos y limpieza de red de agua
Molinos	500 - 700 nominal	150 - 300 nominal	

En la figura 6 se puede ver el consumo de agua que puede llevar un proyecto de perforación exploratoria de acuerdo a las condiciones del suelo de la zona. Los consumos mostrados en la tabla 7 no consideran el gasto que se realiza en la etapa de exploración.

No se encontró una base datos pública con la información del consumo de agua en la etapa de exploración, es por ello que todos los datos mostrados en este trabajo relativos al consumo de agua son obtenidos de esta investigación y se refieren solamente al recurso utilizado en el proceso.

### 2.3 Geología en minas

La geología, al igual que otras ciencias, existe de forma pura y de aplicación. La industria minera, siguiendo su objetivo de encontrar y explotar yacimientos de mineral siempre ha estado ligada a la geología de una u otra forma.

Actualmente las empresas mineras tienen un departamento encargado de la exploración de la mina, ya sea desde su búsqueda inicial hasta la expansión de las reservas que se están extrayendo, que normalmente tiene una guía geológica, dada por investigaciones de geólogos internos, bases de datos del gobierno o por organizaciones científicas. El geólogo de minas es el encargado de encontrar el mineral a ser explotado (McKinstry, 1977).

### **2.3.1 Métodos de exploración minera**

La perforación para exploración minera es uno de los métodos más importantes y puede llegar a ser el más costoso, es vital en la investigación minera, la parte donde se realizan los pozos de exploración debe ser una etapa avanzada del proyecto, donde ya se tiene evidencia de la posible presencia de un yacimiento mineral; a través de perforaciones en el subsuelo se confirma o desmiente las investigaciones de los geólogos sobre un posible yacimiento mineral y así mismo su ley (Rodríguez Soto, 2015).

La perforación puede llegar a durar varios años, y es aquí donde se confirma el trabajo previo realizado por los geólogos, muchas compañías mineras creen que, en promedio, el 40% de presupuesto en exploración debe ser invertido en barrenos (Marjoribanks, 2010).

La elección del tipo de método de perforación que se va a utilizar depende de muchos factores, como el tipo de información geológica que se busca obtener, el tiempo en el que se requiere tener resultados, el presupuesto económico que se tiene, la topografía del lugar, entre otros. En la tabla 8 se observa, según Marjoribanks (2010), la comparación que hay entre las principales técnicas de perforación utilizadas, viendo sus ventajas y desventajas. Entre ellas se destaca en sus ventajas la perforación a diamante, sin embargo, es el método más costoso.

**Tabla 8** Comparación de los diferentes métodos de perforación para exploración.  
**Fuente.** Traducido de "Geological Methods in Mineral Exploration and Mining", 2010.

<i>Tipo de Perforación</i>	<i>Indicaciones</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<i>Hand auger</i>	- Muestreo geoquímico en metros superiores de material no consolidado.	- Portátil y operable. - Muestra no se contamina. - Bajo costo.	- Baja penetración.
<i>Power auger (post-hole digger)</i>	- Muestreo geoquímico en metros superiores de material no consolidado.	- Maquina pequeña y ligera - montada en vehículos o portátil. - De bajo costo.	- Baja penetración (mejor que la hand auger). - La muestra se contamina.
<i>Rotatory air blast (RAB)</i>	- Muestreo geoquímico a base de regolito. - Ideal para muestreo de regolito	- Gran volumen de muestra. - No se necesita preparar el sitio de muestreo. - Rápido y relativamente de bajo costo. - Brinda algo de información geológica.	- Baja penetración de roca dura. - La muestra se contamina. - Profundidad limitada. - No brinda información estructural.
<i>Air core</i>	- Muestreo geoquímico donde se requiere una buena caracterización de la roca base.	- Recuperación de roca pequeña. - Baja contaminación. - Relativamente barato y rápido. - Puede perforar terrenos difíciles con arcilla.	- Tamaño de muestra pequeño.
<i>Reverse circulation (RC)</i>	- Muestreo geoquímico de rocas duras y suaves mayores a los 200m + sobre cuerpos de mineral arriba del nivel freático.	- Muestra sin contaminarse por largos tramos. - Brinda formación geológica de las rocas. - Relativamente rápido y barato a comparación con la perforación a diamante.	- Se necesita preparación de la superficie del sitio por el gran tamaño de las máquinas. - Brinda información limitada. - Poco control de la orientación del pozo.
<i>Diamond</i>	- Orientación del mineral probado a más de 1000m de profundidad con una alta calidad en la muestra.	- Maximiza la información geológica. - Muestra no contaminada, sin adulteraciones, gran cantidad de	- Se requiere preparación de los sitios de perforación. - Se requiere suministro de agua durante la operación.

- Estructura geológica  
entendible.

recuperación.  
- Precisión en el control de la  
orientación del barreno.

- Relativamente pequeño el  
tamaño de muestra.  
- Avance lento.  
- De alto costo.

### 2.3.2 Perforación con Diamante

La perforación con diamante permite obtener un cilindro de roca extraído directamente del subsuelo, para ello utiliza herramienta con pequeños trozos de diamante industrial impregnados en las brocas y las rimas (Figura 9), que son las que se utilizan para cortar la roca del subsuelo y estabilizar la formación del pozo, respectivamente.



**Figura 9.** Broca y Rima para perforación a diamante.  
**Fuente:** (Di-Corp, 2019)

Estas partes van unidas a las barras de perforación, a las que a su vez les es transmitida la fuerza y empuje para rotar e ir profundizando en el pozo.

La broca, seguido de la rima, va al frente de lo que se conoce como “Core Barrel” (barril). En el interior del barril se encuentra un tubo interior que se encarga de capturar la muestra que se está cortando a la vez que se va profundizando en la perforación, a medida que se van introduciendo barras al pozo se incrementa la profundidad del mismo. De igual forma, las barras tienen la función de transportar agua desde la superficie donde se encuentra el operador de la máquina hasta el

fondo del barreno donde está girando la broca. A los pozos de perforación comúnmente se les conoce como barrenos.

La broca durante todo el proceso está siendo lubricada y enfriada por agua que previamente es mezclada con aditivos de perforación para que estabilicen las formaciones geológicas que se están atravesando.

Una vez que el tubo interior se llena de núcleo de roca, este es extraído hacia la superficie mediante un cable que está unido a la cabeza del tubo interior, posteriormente el núcleo es retirado del tubo interior y colocado en una canaleta para posteriormente acomodarse en cajas, medirse y entregarse a los geólogos (Figura 10), se obtiene el porcentaje de recuperación de núcleo y realizan los estudios posteriores que requieren las muestras.

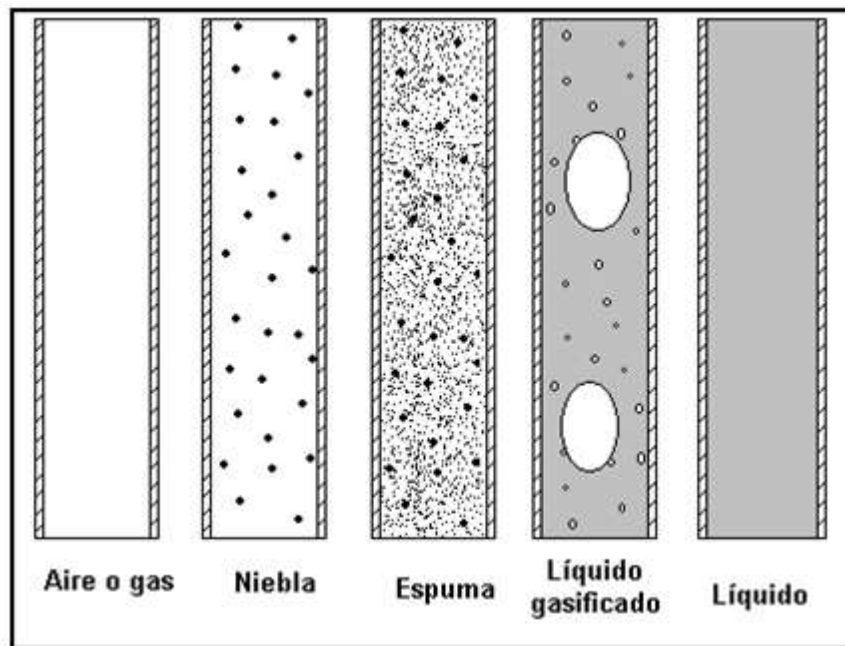


**Figura 10.** Canaleta para medir núcleo de roca.

### **2.3.2.1 Fluidos de perforación**

Existen diferentes tipos de lodos de perforación (Figura 11), se dividen principalmente en 3 grupos: Neumáticos, base agua y base aceite dependiendo del material que se esté buscando, así mismo, tienen subdivisiones y sus funciones son diferentes (Benitez Hernández, Garaicochea Petrirena, & Reyes Alvarez, 1979).

Este trabajo se enfoca en los lodos base agua, que son los más utilizados para los trabajos de exploración minera. Su característica es que la fase acuosa es la principal (Villegas, 2017).



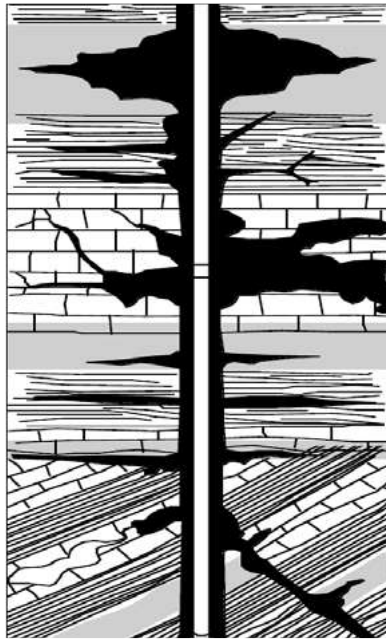
**Figura 11.** Diferentes tipos de lodos de perforación.

**Fuente:** (Benitez Hernández, Garaicochea Petrirena, & Reyes Alvarez, 1979)

En el proceso de barrenación los fluidos o lodos de perforación son la mezcla que se obtiene de los aditivos de perforación con agua. Estos son bombeados desde la superficie, a la altura de la máquina de perforación, por el interior de la tubería hasta llegar al fondo del pozo y sale hacia la superficie por el espacio anular que hay entre la barra y la pared del barreno. El uso de ellos es fundamental durante el proceso debido a sus múltiples funciones que brindan en los diferentes terrenos que se trabaja. Previenen posibles problemas técnicos, minimizan la contaminación por sus componentes y permite sacar completamente el recorte manteniendo limpio el pozo (Kudaikulova, 2015). Además, lubrica la broca y estabiliza las barras, disminuye el riesgo de que el agua escape por las cavernas de las formaciones rocosas, reduce

el torque y la vibración, mantiene los sólidos en suspensión y ayuda a sostener el peso de la herramienta.

Hay ocasiones en las que se pierde la circulación cuando la totalidad del fluido se desplaza hacia la formación dentro del barreno, este fenómeno es inducido por las fracturas o la presencia de zonas cavernosas en la perforación (Figura 12), existen diferentes tipos de aditivos para sellar los poros por los que se desplaza el fluido y que este retorne hacia la superficie.



**Figura 12.** Secciones de pérdida de circulación hacia la superficie.

**Fuente:** Obtenido de tesis “Remediación del fluido de perforación optimizando la reducción de su impacto ambiental” por Sonia Palacios Jesús, Lima, 2010,

Se estima que el costo que representa el uso de aditivos en el proceso es alrededor del 20% del total, sin embargo, puede representar hasta un 70% de los problemas que se presentan en el pozo (Anawe & Folayan, 2018), es por ello la importancia de la selección del aditivo adecuado.



El éxito en los pozos de perforación está ligado principalmente a la experiencia que tenga el operador de la perforadora junto con el uso correcto de los aditivos de perforación que utilice (Caenn, Darley, & Gray, 2011).

## **2.4 Sistemas de recirculación de agua**

Los principales residuos que se generan durante el proceso son los lodos de perforación (Galitskova, 2018) , anteriormente estos residuos solamente se dejaban en un cárcamo para decantarse, posteriormente retirar el agua y tratar el residuo final.

Un sistema de recirculación de agua en actividades de exploración minera, es el conjunto de procedimientos que llevan a tratar y reutilizar el agua en el proceso de perforación para disminuir el consumo de agua, optimizar el proceso y reducir costos. Actualmente existen diversos tipos de sistemas que una empresa de perforación puede rentar o comprar. Estos sistemas varían en sus características de tamaños, capacidad de tratamiento y practicidad.

Un sistema ideal es el que no entorpece o retrasa la operación en su proceso, para esto la capacidad de tratamiento debe de soportar el consumo que tiene la máquina de perforación. Esto varía dependiendo del diámetro de roca que se esté perforando. Así mismo algunos de estos sistemas no se adaptan completamente al proceso y su precio puede ser costoso.

### **2.4.2 Uso de floculantes**

Algunos de los sistemas de recirculación de agua se apoyan en las sustancias floculantes para ayudar al proceso. Los procesos de coagulación-floculación son utilizados desde hace décadas para desestabilizar suspensiones coloidales, estos, junto con la floculación química, logran precipitar diferentes sustancias, para después ser removidas mediante sedimentación o filtración (Díaz, 2014).

Se le llama coagulación al proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, adhiriendo sustancias coagulantes (se le llama coagulante a la sustancia con esta propiedad) químicos y la energía del mezclado (Díaz, 2014). La agrupación de las partículas previamente desestabilizadas constituye la floculación. Con el uso de floculantes es posible agrupar los sólidos del recorte de perforación y sacarlos hacia la superficie.

El uso de polímeros en las actividades de perforación minera se realiza desde 1970 (Yan, 2001). Podemos generalizar al decir que cualquier forma de tratamiento en el que se utilicen polímeros solubles en agua es un sistema de lodos de perforación. En la aplicación, los lodos de perforación son los agentes principales que llevan el control de las condiciones del barreno para beneficio de la operación (Luhenga, 2014).

El polímero mayormente usado en las actividades de perforación es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA) un polímero capaz de flocular los recortes de perforación y la bentonita utilizada en el proceso, este polímero se descubrió en 1960 y fue utilizado por primera vez en 1966 (Luhenga, 2014).

### **2.4.3 Calidad del agua en el proceso**

Las condiciones que debe tener el agua al momento de ser utilizada en el proceso son muy específicas. De acuerdo a las recomendaciones para el funcionamiento de los lodos de perforación de la empresa australiana AMC en el “Curso básico de fluidos para perforación, funciones y prácticas” realizado en el 2017, por el capacitador Omar Rodríguez, principalmente se deben de cuidar dos aspectos:

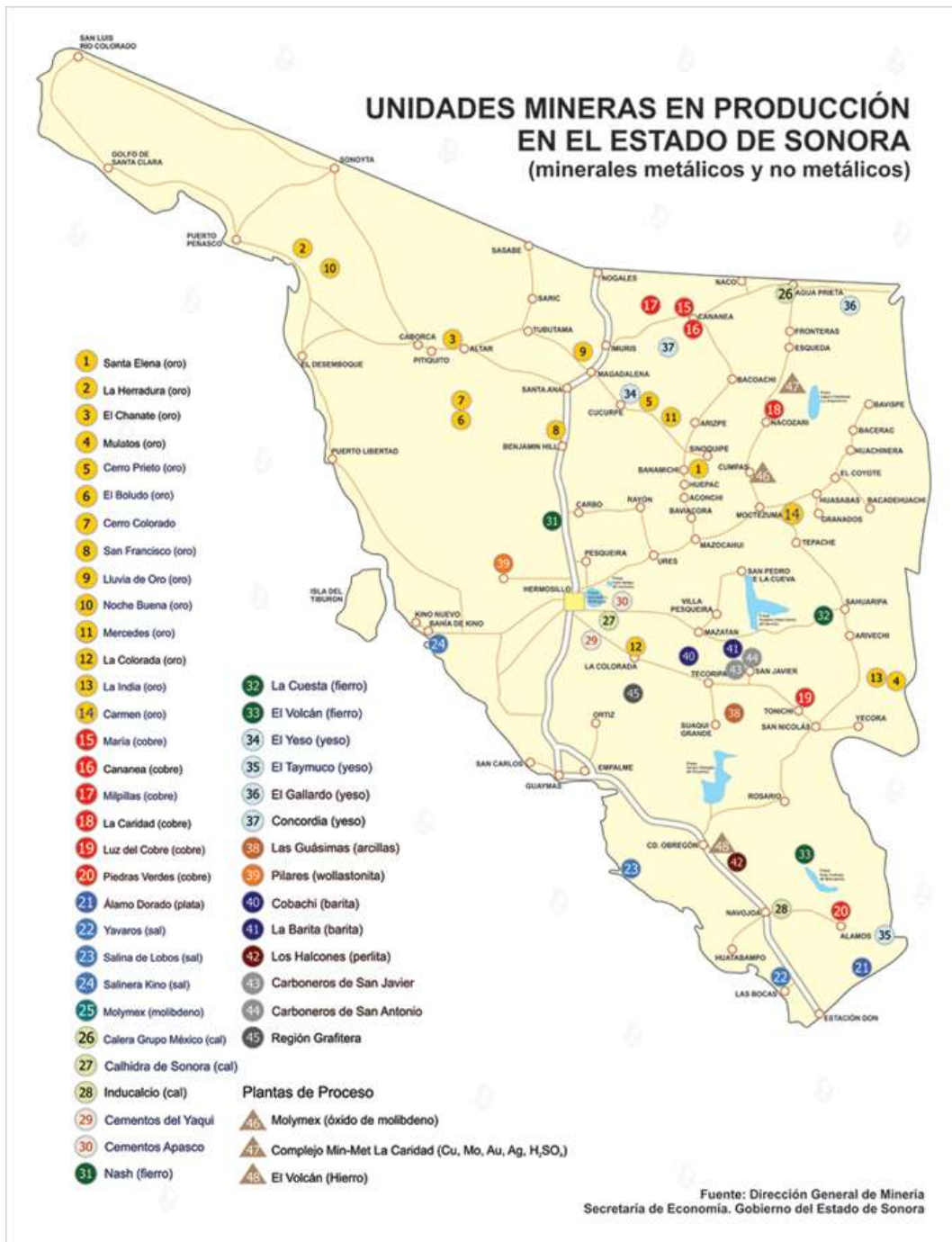
1. pH (Concentración del ion de hidrogeno).
2. Dureza Total (Contenido de CaO, MgO).

El pH = 8-10 y la Dureza Total <175 ppm es el rango ideal para el desarrollo de la bentonita y los polímeros. Para medir esto, en ocasiones se les brinda a los operadores de las máquinas medidores de láminas que se usan en campo por cuestiones de practicidad.

## **Capítulo 3: Metodología**

### **3.1 Descripción del área de estudio**

Este trabajo se realizó en el estado de Sonora (Figura 13); las etapas de planeación, diseño y construcción se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V. localizada en la ciudad de Hermosillo. Las pruebas del prototipo se realizaron en un proyecto de perforación cerca de Caborca para una importante empresa minera del país. Así mismo, las actividades relacionadas con la etapa de análisis de las muestras se realizaron en las instalaciones del Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNYN), en la ciudad de Ensenada, Baja California.



**Figura 13.** Unidades Mineras en Producción en el Estado de Sonora (Sonora, 2019).  
**Fuente:** Extraído del Portal del Gobierno del Estado de Sonora.

## **3.2 Hipótesis**

Es posible diseñar e implementar un sistema de recirculación, mediante el uso de tinajas de depósito de agua proveniente del retorno de perforación, utilizando floculantes y un equipo de bombeo para acelerar la separación de los sólidos suspendidos y posteriormente preparar el agua tratada y reincorporarla al proceso de perforación, manteniendo la calidad requerida y cuidando al medio ambiente, disminuyendo el consumo de agua por metros perforados.

## **3.3 Metodología desarrollada**

### **3.3.1 Diseño e implementación del sistema de recirculación**

En esta etapa se especificó la capacidad del sistema, así como las rutas de flujo que tomó el agua a tratar, se eligió el equipo que hizo el mezclado de la masa de agua, se diseñó y construye el prototipo, así como el procedimiento de uso para capacitar al personal que lo usó en el proceso. Posteriormente se probó el sistema en un proyecto de perforación para perforación minera y se llevó a cabo el seguimiento de consumo de agua por metros perforados.

#### **3.3.1.1 Definición de capacidad de la tina de remoción de sólidos**

El proceso de perforación normalmente utiliza una tina de 10 mil litros por máquina, donde se vierte el agua virgen mediante pipas que acarrearán el agua desde la fuente (normalmente pozos) hacia la máquina barrenadora. Por lo tanto, el depósito a diseñar no puede ser igual o mayor a esa cantidad. Así mismo haciendo un estudio de la demanda requerida por la máquina de perforación, de acuerdo al diámetro que está perforando (Tabla 9), se decidió construir una tina con una capacidad de aproximadamente 5 mil litros, para garantizar que hubiera suficiente agua en el consumo del proceso.

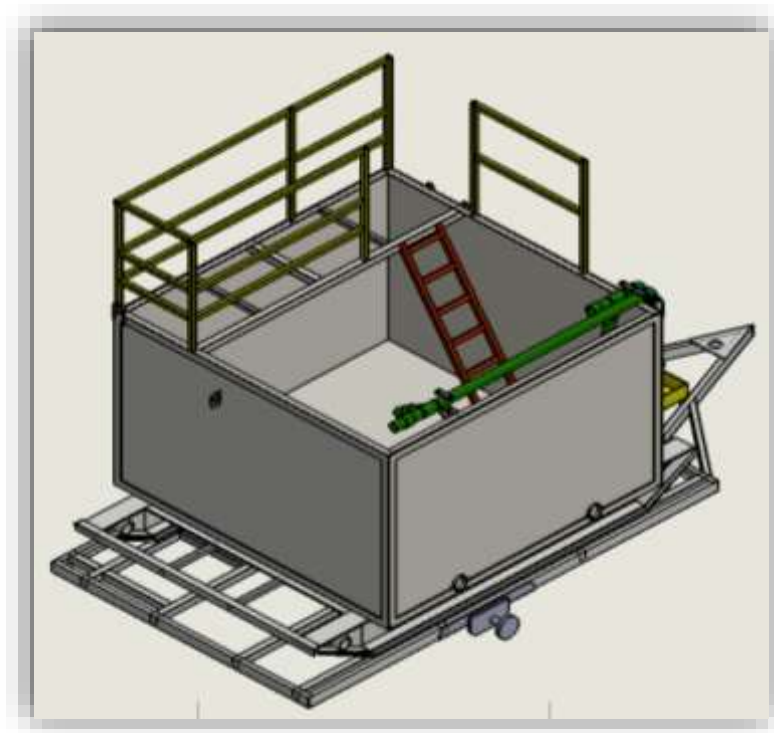
**Tabla 9** Consumo de agua de acuerdo al diámetro de perforación

Fuente: Manual técnico del perforista, Christensen, 2016

HO	$3 \frac{1}{2}$ in (88,9 mm)	de 39 a 48 litros / minuto
NO	$2 \frac{3}{4}$ in (69,9 mm)	de 31 a 38 litros / minuto
BO	$2 \frac{3}{16}$ in (55,6 mm)	de 23 a 30 litros / minuto

### 3.3.1.2 Definir rutas de flujo del agua

Se tomó la decisión de utilizar dos rutas de flujo solamente, combinadas con una serie de válvulas para usarlas tanto para la alimentación de la tina (Figura 14), como para el mezclado y posteriormente el vaciado de la misma. Así mismo se tuvo que diseñar y fabricar una base para que se pudiera movilizar la tina.



**Figura 14.** Diseño de Tina de Remoción de Sólidos

### 3.3.1.3 Determinar equipo de bombeo para succión y mezclado de agua

El equipo a seleccionar para el mezclado del agua tiene que ser práctico para una fácil movilidad, además de contar con la suficiente potencia para el volumen que se estará manejando. Para cumplir estos requisitos se seleccionó la Motobomba Honda WL20XM (Figura 15), con ella se puede mover hasta 670 L/ min de agua limpia según las características del fabricante. Esta información es tomando en cuenta el mezclado de agua pura en condiciones ideales. El agua que se mezclaría estaría saturada con sólidos y aditivos de perforación, lo que disminuiría la capacidad, pero todo esto se tomó en cuenta al diseñar el procedimiento de uso del sistema. Utilizando este equipo de bombeo se dieron 8 minutos para hacer el mezclado de aproximadamente 4 mil litros por ciclo.



**Figura 15.** Motobomba Honda WL20-MFX de 2 pulgadas, motor de gasolina.

**Fuente:** (Honda, 2019).



### 3.3.2 Obtención de muestras de agua

Se tomó una muestra de 40 litros de agua virgen para determinar las condiciones con las que se inicia el proceso, adicionalmente, se tomaron muestras provenientes del retorno y del agua de salida del sistema de recirculación (Figura 16).



**Figura 16.** Muestras tomadas en el sitio de perforación.

### 3.3.3 Pruebas de laboratorio

Todas las pruebas realizadas durante este trabajo fueron en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología, con sede en Ensenada, Baja California.

#### **Caracterización**

Se realizó una caracterización, que incluyó medición del pH y temperatura a cada una de las tres muestras (Figura 17).



**Figura 17.** Calibración del potenciómetro.

### **Balance de materia por diferencia de pesos**

La metodología para la obtención de los sólidos suspendidos se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba, tal como se describe a continuación (NMX-AA-034-SCFI-2015, 2015).

Se realizó un balance de masa en las tres muestras tomadas en el proyecto de perforación mediante la evaporación del agua de cada una de ellas, obteniendo la diferencia de peso.

### **Preparación de las muestras**

Se tomaron 3 matraces pequeños y se pesaron. Posteriormente utilizando una micro pipeta se vertieron 10 mL de las 3 muestras (Figura 18).



**Figura 18.** Agua virgen, agua de retorno y agua tratada.

### **Secado**

Se colocaron las muestras en una placa calefactora por aproximadamente 1.5 h hasta que se evaporó el agua y quedaron los sólidos en los recipientes. Las pruebas se replicaron en tres ocasiones para disminuir el error experimental (Figura 19).



**Figura 19.** Muestras en placas calefactoras.

### **Pesaje final**

Una vez realizado el secado se pesaron nuevamente los recipientes y se restó el valor inicial para obtener de esta manera la masa de los sólidos (Figura 20).



**Figura 20.** Recipientes con sólidos después del secado.

## Capítulo 4: Resultados

### 4.1 Construcción del prototipo

La construcción del sistema de recirculación se realizó en el taller de Itzcoatl Drilling and Services S.A. de C.V. ubicado en la ciudad de Hermosillo, Sonora, donde se dejó listo para posteriormente ser movilizado al sitio de perforación.



Figura 21. Diferentes etapas de construcción del sistema de recirculación de agua.

## 4.2 Implementar sistema en proyecto de perforación

### Traslado de prototipo y capacitación

Una vez terminado el prototipo se llevó al lugar donde se llevarían a cabo las actividades de perforación. Una vez instalado el equipo, se capacitó al empleado encargado de operarlo.



**Figura 22.** Prototipo instalado en área de barrenación

### Inicio del proceso

El agua es depositada en una tina de aproximadamente 10 mil litros donde es bombeada hacia otro contenedor de mil litros a ser mezclada con aditivos de perforación y succionada por la bomba principal de la máquina, así de esta manera inyectar los fluidos de barrenación por dentro de la tubería, para que, teniendo condiciones favorables, retorne hacia la superficie por el espacio angular entre las barras y la formación rocosa.



**Figura 23.** Pileta de agua virgen junto a la pipa de acarreo que la abastece.

### **Retorno de agua**

El agua se empieza a inyectar desde antes de que la broca toque la capa superficial del suelo y se continúa utilizando durante todo el proceso.

Cuando se tiene una formación que no tenga fracturas el agua tiende a retornar hacia la superficie. Una vez que esto sucede se coloca un aditamento que evita que el agua se esparza y pueda ser orientada hacia los cárcamos, construidos en la tierra mediante un canal cubierto con hule, para evitar filtración. Este proceso continúa hasta que se llena un cárcamo para posteriormente aprovechar y tratar esa agua (Figura 24).



**Figura 24.** Agua retornando hacia la superficie y siendo dirigida hacia los cárcamos.

### **Tina de remoción de sólidos**

Una vez que el cárcamo tiene suficiente agua, esta se mueve hacia la tina de remoción de sólidos mediante una motobomba hasta alcanzar la cantidad de aproximadamente 4 mil litros. Esta agua que está retornando hacia la superficie contiene sedimentos de roca (recorte) y aditivos de perforación.

Una vez que se tiene la tina con el volumen de agua indicado anteriormente, se cierra la válvula de alimentación para que el agua pueda moverse en un circuito cerrado y no entre mayor cantidad de agua que disminuya la concentración y el floculante pueda ser mezclado. La cantidad de floculante (**System Flocc 360**) que se vierte por cada 4 mil litros de agua a tratar debe de ser 2 litros (Figura 25).





**Figura 25.** Alimentación de tina de remoción de sólidos

### **Tiempo de mezclado**

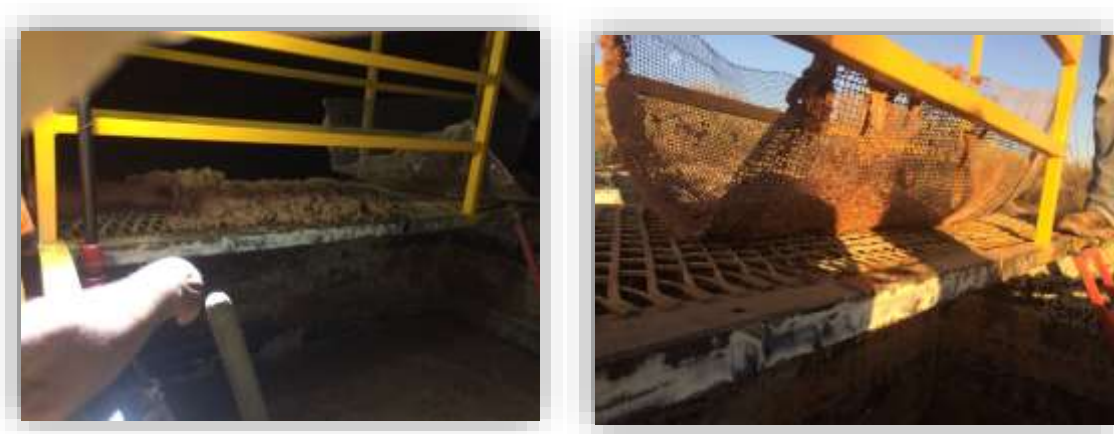
Con el equipo de bombeo, el tiempo de mezclado de la masa de agua es de aproximadamente de 5 a 8 minutos para asegurar que la reacción ocurra. En ese tiempo visualmente se puede notar el cambio al momento de que floculan los sólidos suspendidos, algunos sedimentan y otros van hacia la superficie (Figura 26).



**Figura 26.** Sólidos floculados flotando en la superficie.

### **Vaciado de tina y remoción de sólidos floculados**

Una vez que pasa el tiempo de mezclado, el agua tratada se mueve mediante una motobomba al depósito de 1000 L dónde se realiza el mezclado con aditivos para reingresarse al proceso. Los sólidos floculados flotando en la superficie del agua son removidos mediante una malla y puestos a secar para después desecharse en lugares autorizados por la mina (Figura 27).



**Figura 27.** Remoción de sólidos encapsulados.

### **Seguimiento de consumo de agua**

Se utilizó el prototipo de recirculación de agua en los 2 primeros pozos que se realizaron y se llevó a cabo el registro de una bitácora de consumo de agua limpia para determinar la eficacia del sistema (Anexo 1 y 2). Estos datos serán mostrados más adelante en el análisis de resultados de este trabajo.

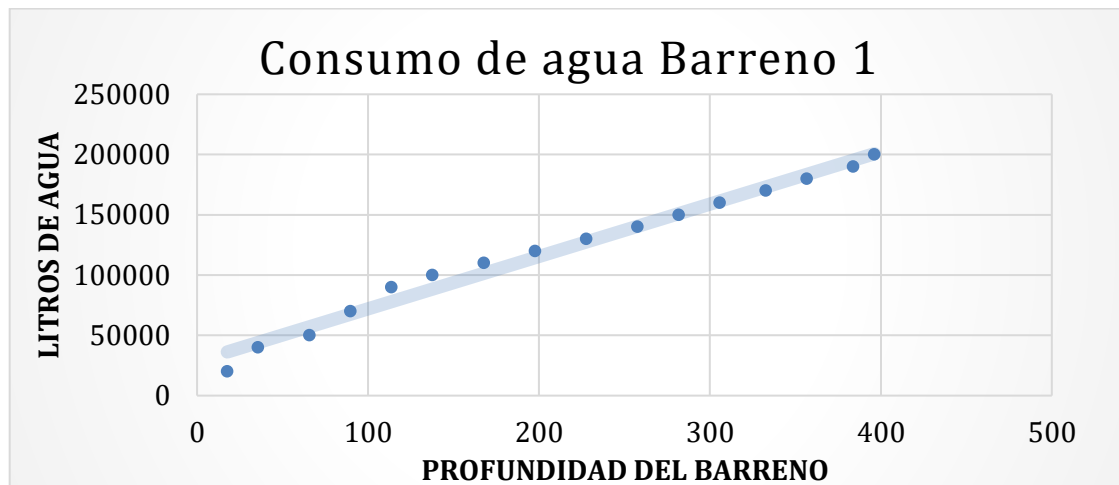
Como se mencionó anteriormente, solamente se utilizó la tina en los primeros dos barrenos que se realizaron en el proyecto, esto fue debido a que, en los siguientes barrenos, la empresa minera responsable de los trabajos de exploración requirió que utilizáramos un sistema de recirculación de agua patentado. A continuación, se muestran los resultados de los barrenos de prueba.

### 4.3 Resultados de barrenos de prueba

#### 4.3.1 Barreno 1

En este pozo se tuvo una pérdida completa de recirculación desde los 35 metros, que se logró recuperar parcialmente a los 114 metros de profundidad, teniendo poco menos de 100 metros de perforación donde se estuvo trabajando con agua virgen.

Se requiere mezclar 2 L de floculante por cada 4,000 L de agua de retorno. En la primera prueba se utilizaron 1.5 L de floculante para observar el comportamiento del proceso y prevenir problemas de sedimentación por dentro del pozo que pusiera en riesgo la operación. En la figura 28 se muestra la gráfica de consumo de agua por metro perforado.



**Figura 28.** Consumo de agua en el primer pozo de perforación.

Profundidad: 396.2

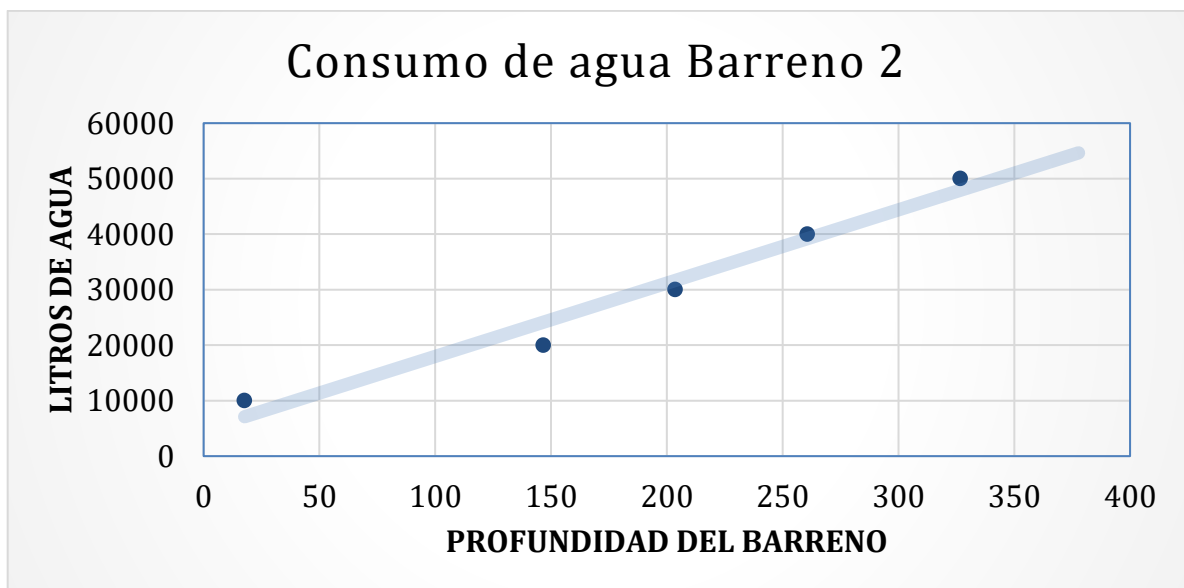
Consumo total de agua: 200,000 litros

Promedio de consumo por metro perforado: 504.83 l/m

### 4.3.2 Barreno 2

En este barreno se tuvo retorno de agua hacia la superficie desde el inicio de la perforación hasta su terminación, además se realizó el cambio a 2 L de floculante cada 4 mil litros de volumen de agua de retorno.

En la Figura 29 se puede ver el comportamiento que hubo del consumo de agua por metros perforados en el barreno 2.



**Figura 29.** Consumo de agua en el segundo pozo de perforación.

Profundidad: 377.75

Consumo total de agua: 50,000 lt

Promedio de consumo por metro perforado: 132.4 l/m

## Capítulo 5: Análisis de Resultados

### 5.1 Consumo de agua

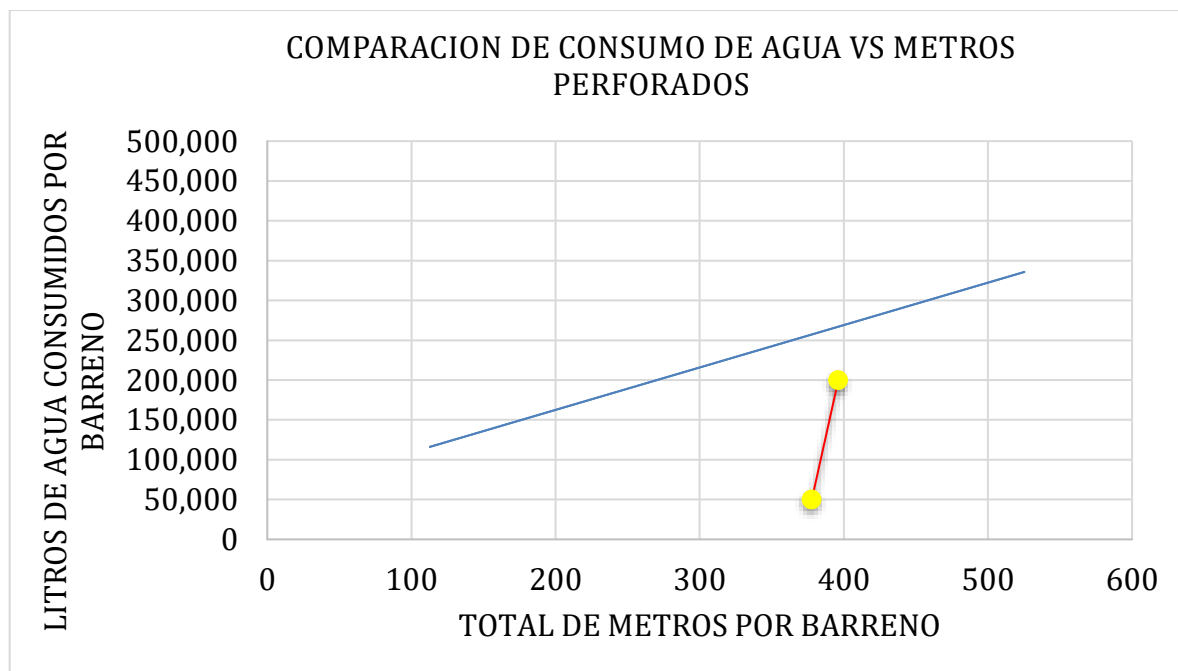
Utilizando la información de los dos barrenos (puntos amarillos), donde se utilizó el sistema de remoción de sólidos, se comparó primeramente con el consumo de agua en un proyecto donde mayormente hubo retorno de agua hacia la superficie, pero no un sistema para tratar el agua (Figura 30).

Promedios de consumo de agua por metro perforado:

Proyecto cerca de Hermosillo: **482.82 L/m (17 barrenos)**

Barreno 1: **504.83 L/m**

Barreno 2: **132.31 L/m**



**Figura 30.** Comparación de resultados con un proyecto sin sistema de recirculación utilizado.

En la figura anterior se compara el promedio de consumo de agua de un proyecto donde se realizaron 17 barrenos, cerca de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Se puede ver la gran diferencia de consumo comparado con los 2 barrenos donde se utilizó el sistema de recirculación de agua.

El barreno 1, aun teniendo los problemas de pérdida de recirculación tuvo un promedio por debajo de la tendencia que muestra la tabla, se puede ver que el consumo de agua incrementa a medida que se profundiza el pozo, se muestra claramente cómo a profundidades mayores se mantiene por debajo de la media.

En el barreno 2 se realizaron correcciones de la operación del sistema, se utilizaron 2 litros de floculante y la formación no presentó cavernas que provocaran la pérdida del retorno, permitiendo mantener el consumo muy por debajo de la media.

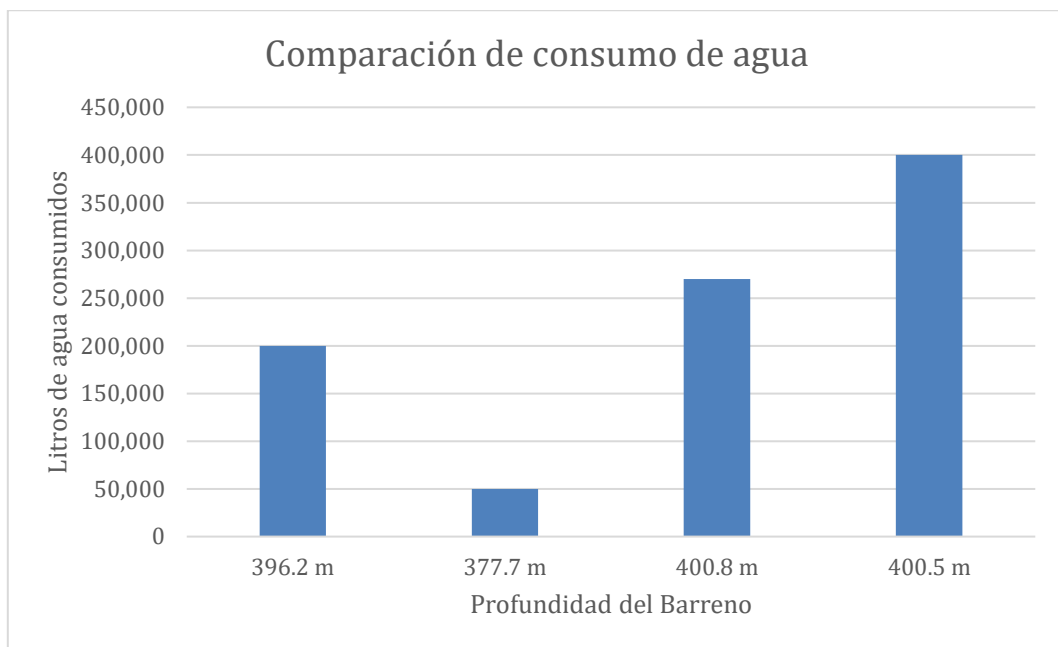
### **5.1.2 Comparación de consumo de agua con un sistema patentado**

En el mismo sitio donde se realizaron los dos barrenos con el sistema de recirculación desarrollado, se realizaron más pozos utilizando un sistema patentado de la empresa SIAT MINING (Anexo 3).

Para hacer la comparación, se tomó un barreno con las características similares en cuanto a profundidad y que haya tenido retorno de agua hacia la superficie, así mismo, se tomó un barreno con características similares del proyecto donde se tuvo retorno hacia la superficie, pero no se contaba con un sistema de recirculación.

A continuación, se muestra la diferencia en el consumo de agua de cuatro barrenos con las siguientes profundidades (Figura 31):

Barreno prueba 1 (BP1):	<b>396.2 m</b> de profundidad.
Barreno prueba 2 (BP2):	<b>377.7 m</b> de profundidad.
Barreno con sistema patentado (BSRP):	<b>400.8 m</b> de profundidad.
Barreno sin sistema de recirculación (P11):	<b>400.5 m</b> de profundidad.



**Figura 31.** Comparación de consumo entre barrenos (BP1, BP2, BSRP, P11)

La figura 31 nos permite ver la diferencia de consumo de agua que se tuvo con las diferentes opciones que se tienen. Los dos barrenos donde se utilizó el sistema de recirculación diseñado tuvieron un mejor rendimiento en consumo de agua comparado con el que utilizó un sistema patentado.

### 5.1.3 Comparación de costos

Para determinar la viabilidad del uso del sistema de recirculación fue necesario realizar un análisis de los costos de operación que conlleva cada sistema.

En la tabla 10 podemos ver un resumen de los costos y consumo de cada sistema para determinar su viabilidad en el uso de ellos.

**Tabla 10.** Comparación de costos entre los sistemas de recirculación utilizados

NOMBRE DE BARRENO	FONDO	CONSUMO DE AGUA (LT)	ACARREO (PESOS)	COSTO DEL SISTEMA		TOTAL, DE COSTO
				DÓLARES	PESOS	
BP1	396.2 m	200,000	\$25,000.00	\$810.00	\$16,200.00	\$41,200.00
BP2	377.7 m	50,000	\$6,250.00	\$810.00	\$16,200.00	\$22,450.00
BSRP 15	400.8 m	270,000	\$32,500.00	\$700.00	\$14,000.00	\$46,500.00
P11	400.5 m	400,000	\$50,000.00		N/A	\$50,000.00

La tabla anterior nos permite ver que el BP2 mostró menor consumo de agua y costo.

## 5.2 Remoción de sólidos suspendidos

### 5.2.1 Remoción de sólidos suspendidos con sistema de recirculación propio

El objetivo principal del sistema de recirculación es remover la mayor cantidad de sólidos suspendidos posible, para así reducir el consumo de agua por metro perforado. La tabla 11 nos muestra un resumen de los resultados obtenidos a las muestras analizadas en laboratorio del sistema propio. Estas pruebas se hicieron por triplicado para reducir el error experimental.



**Tabla 11.** Resultados de pruebas de laboratorio de remoción de sólidos suspendidos del sistema diseñado en este proyecto.

MUESTRAS	PRUEBA	AGUA VIRGEN	ANTES DE ENTRAR AL SISTEMA	SALIENDO DEL SISTEMA
PH		6.87	7.43	7.73
PESO ANTES DE LA EVAPORACIÓN (mg)	1	7934.72	8052.39	7961.45
	2	10904.4	7961.88	8518.92
	3	9829.05	8154.65	8035.46
PESO DESPUES DE LA EVAPORACIÓN (mg)	1	7937.41	8107.2	7992.3
	2	10907.34	8014.3	8551.28
	3	9832.07	8207.55	8072.16
DIFERENCIA DE PESO (mg)	1	2.69	54.81	30.85
	2	2.94	52.42	32.36
	3	3.02	52.9	36.7
% DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS	1		<b>43.71%</b>	
	2		<b>38.27%</b>	
	3		<b>30.62%</b>	

Los resultados nos dan un promedio de 38% de remoción de sólidos.

### 5.2.2 Remoción de sólidos suspendidos con sistema de recirculación patentado

Se realizaron las mismas pruebas de laboratorio para las muestras del barreno donde se utilizó un sistema de recirculación de agua patentado. La tabla 12 nos muestra los resultados.

**Tabla 12.** Resultados de pruebas de laboratorio de remoción de sólidos suspendidos del sistema de recirculación patentado.

MUESTRAS	PRUEBA	ANTES DE ENTRAR AL SISTEMA	SALIENDO DEL SISTEMA
PH		7.5	7
PESO ANTES DE LA EVAPORACIÓN (mg)	1	8081	8079
	2	8289	7842
	3	7772	8172
PESO DESPUES DE LA EVAPORACIÓN (mg)	1	8138	8134
	2	8350	7892
	3	7840	8224
DIFERENCIA DE PESO (mg)	1	57	55
	2	61	50
	3	68	52
% DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS	1	<b>3.51%</b>	
	2	<b>18.03%</b>	
	3	<b>23.53%</b>	

El porcentaje de remoción de sólidos promedio que se obtuvo fue de 15%.

### 5.3 Indicadores de Ecoeficiencia

El concepto de ecoeficiencia “se obtiene por medio del suministro de bienes y servicios a precios competitivos, que satisfagan las necesidades humanas y proporcionen calidad de vida, mientras progresivamente reducen los impactos ecológicos y el consumo de recursos a lo largo de su ciclo de vida, por lo menos hasta un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la tierra (Lehni, 2000).

Los indicadores de ecoeficiencia miden el funcionamiento ambiental y financiero de las empresas, de manera que se puedan hacer comparaciones globales entre ellos (Sturm & Müller, 2001). Estos indicadores son utilizados por diversas

organizaciones como la United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (Rincón & Ann, 2011).

Se utilizó la metodología de la UNCTAD descrita en el artículo de Rincón y Ann publicado en el 2011 para comparar los sistemas de circulación de agua en el sitio muestreado. Cabe destacar que los autores describen que la metodología propuesta por la UNCTAD es la más adecuada para medir el desempeño ambiental de las empresas mexicanas pequeñas.

Esta metodología determina la ecuación para obtener un indicador cuando se trata de consumo de agua de la siguiente manera:

$$\text{Indicador de Ecoeficiencia (IE)} = \frac{\text{Consumo de agua}}{\text{Valor agregado neto}}$$

Definiendo los conceptos para el análisis de los sistemas, se tiene:

**Consumo de agua:** Cantidad total en metros cúbicos de agua utilizada en cada barreno.

**Valor neto agregado:** Ingresos – Costos totales de operación.

Aplicando la ecuación de indicador de ecoeficiencia anterior a los valores mostrados en la tabla 12 podemos comparar los dos sistemas de recirculación de agua y el proyecto donde no se utilizó ningún sistema de recirculación.

Para calcular el valor agregado neto se asignó un valor promedio de 100 dólares por metro perforado, así mismo para fines prácticos usaremos la equivalencia de 20 pesos = 1 Dólar.

### 5.3.1 Indicador de Ecoeficiencia en BP1

Precio promedio por metro: 100 Dólares

Consumo de agua: 200,000 L = 200 m<sup>3</sup>

Metros perforados: 396.2 m

Costos: Acarreo de agua + Costo del sistema

Costos: \$25,000 + \$16,200

Costos: \$41,200

$$IE (BP1) = \frac{200 m^3}{((100)(\$20)(396.2)) - \$41,200}$$

$$IE (BP1) = \frac{200 m^3}{\$751,200}$$

$$IE (BP1) = \mathbf{0.00027}$$

### 5.3.2 Indicador de Ecoeficiencia en BP2

Precio promedio por metro: 100 Dólares

Consumo de agua: 50,000 L = 50 m<sup>3</sup>

Metros perforados: 377.7 m

Costos: Acarreo de agua + Costo del sistema

Costos: \$6,250 + \$16,200

Costos: \$22,450

$$IE (BP2) = \frac{50 m^3}{((100)(\$20)(377.7)) - \$22,450}$$

$$IE (BP1) = \frac{50 m^3}{\$732,950}$$

$$IE (BP1) = \mathbf{0.0000682}$$

### 5.3.3 Indicador de Ecoeficiencia en BSRP

Precio promedio por metro: 100 Dólares

Consumo de agua: 270,000 L = 270 m<sup>3</sup>

Metros perforados: 400.8 m

Costos: Acarreo de agua + Costo del sistema

Costos: \$32,500 + \$14,000

Costos: \$ 46,500

$$IE (BSRP) = \frac{270 m^3}{((100)(\$20)(400.8)) - \$46,500}$$

$$IE (BSRP) = \frac{270 m^3}{\$755,100}$$

$$IE (BSRP) = \mathbf{0.00036}$$

### 5.3.4 Indicador de Ecoeficiencia en P11

Precio promedio por metro: 100 Dólares

Consumo de agua: 400,000 L = 400 m<sup>3</sup>

Metros perforados: 400.5 m

Costos: Acarreo de agua + Costo del sistema (no hubo sistema de recirculación)

Costos: \$50,000 + \$ 0

Costos: \$50,000

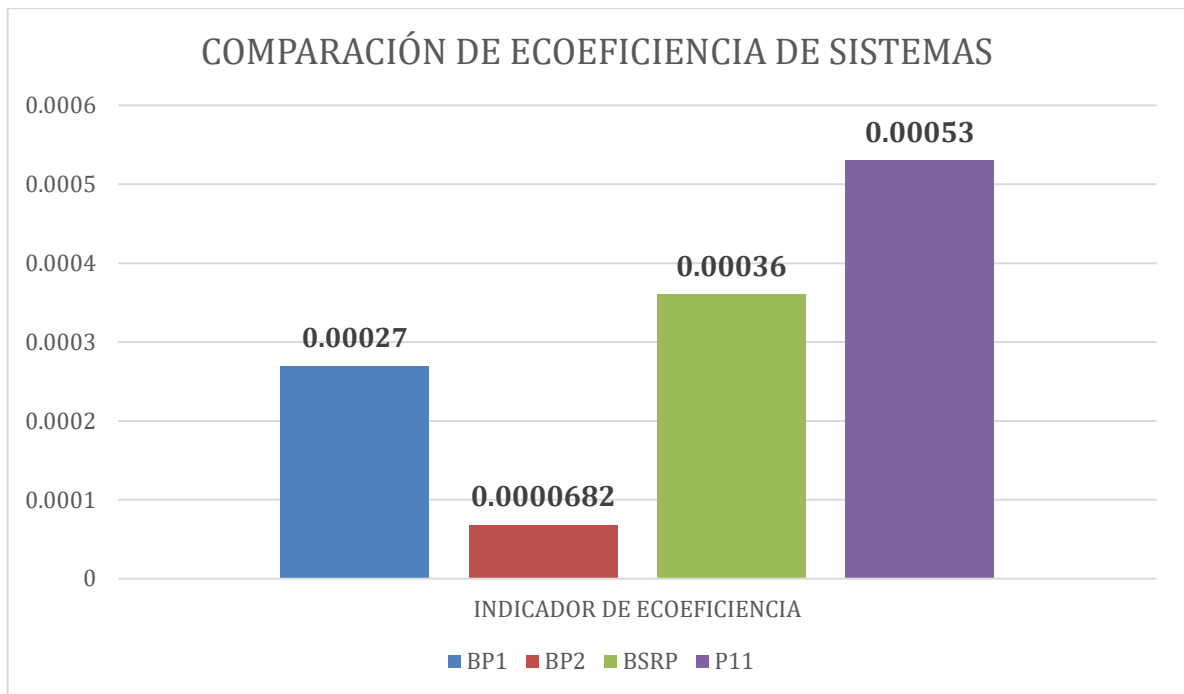
$$IE (P11) = \frac{400 m^3}{((100)(\$20)(400.5)) - \$50,000}$$

$$IE (P11) = \frac{400 m^3}{\$751,000}$$

$$IE (P11) = \mathbf{0.00053}$$

## 5.4 Resumen de Indicadores de Ecoeficiencia

La Figura 32 nos muestra los resultados de los 3 sistemas y el barreno control que se compararon.



**Figura 32.** Comparación de Indicadores de Ecoeficiencia.

La metodología de la UNCTAD nos dice que entre más bajo sea el valor obtenido mayor es la ecoeficiencia del proceso. Bajo este principio, podemos confirmar que los dos barrenos donde se utilizó el sistema de recirculación propio tuvieron valores inferiores al del sistema de recirculación patentado. Así también el indicador que tuvo el valor más alto es del P11 donde no se utilizó ningún sistema de recirculación.

## Capítulo 6. Conclusiones

Se diseñó, construyó e implementó un sistema de recirculación en un proyecto de exploración para una empresa minera líder a nivel mundial y de las más importantes en México y Latinoamérica.

Analizando el consumo de litros de agua por cada metro perforado (L/m), el sistema de recirculación propio brindó un rendimiento superior en un 80% en comparación con un sistema tradicional, ambos sistemas fueron probados en el mismo sitio de muestreo bajo las mismas condiciones de terreno. Así mismo, analizando los costos operativos de cada uno, resultó más económico el sistema diseñado en este trabajo de investigación.

Las pruebas de remoción de sólidos se hicieron en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Autónoma de México, sede en Ensenada Baja California, con base en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, donde se describe la evaporación como un método efectivo para medir los sólidos suspendidos totales en soluciones acuosas; El sistema de recirculación diseñado e implementado en este proyecto obtuvo una remoción de sólidos superior en un 23% en comparación de un sistema patentado.

Utilizando la metodología de la UNCTAD, fue posible comparar diferentes sistemas utilizables en el proceso productivo de la compañía Itzcoatl, Drilling and Services, S.A. de C.V., obteniendo un Indicador de Ecoeficiencia que relaciona los aspectos ambientales con los factores económicos, confirmando que el proceso que mostró una mayor ecoeficiencia fue el diseñado y construido en el desarrollo de este trabajo.

Los problemas ambientales actuales representan un desafío para la continuidad de los procesos productivos, de este trabajo se concluye que la utilización del sistema



de recirculación de agua propuesto presenta una oportunidad a las empresas de perforación minera para que mantengan los niveles de producción mientras se disminuye el consumo de recursos, manteniendo su competitividad y mejorando sus indicadores de desempeño ambiental.

## Recomendaciones

Se enlistan las recomendaciones para dar continuidad a este proyecto, las cuales no se realizaron debido a que el desarrollo de dichas actividades sobrepasaba el alcance de este trabajo.

- Desarrollar pruebas adicionales en un mayor número de barrenos.
- Realizar análisis estadístico, una vez que se cuente con suficientes datos.
- Realizar pruebas con diferentes tipos de floculantes, naturales y sintéticos.
- Realizar pruebas con diferentes sistemas de mezclado del agua.
- Adecuar un sistema de limpieza de la tina de remoción de sólidos.
- Medir cantidad de sólidos que se remueven por cada 4,000 L.
- Determinar la posibilidad de uso del residuo como un subproducto del proceso.

## Bibliografía

- Agudelo C., R. M. (2005). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 91-102.
- Anawe, P., & Folayan, A. (2018). *Advances in drilling fluids rheology*. Beau Bassin, Mauricio.: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Benitez Hernández, M. A., Garaicochea Petrirena, F., & Reyes Alvarez, C. (1979). *Apuntes de Fluidos de Perforación*. Mexico, DF.: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Bohnet, E. L., Winkle , R. F., & Edmiston, K. J. (1987). Surface Mining. *Mining Annual Review*, 187 - 207.
- Caenn, R., Darley, H., & Gray, G. R. (2011). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing.
- Cárdenas, J. (2013). La minería en México: Un despojo a la nación. *Cuestiones Constitucionales*, 35 - 74.
- Christencen, D. (2016). *Manual Técnico del Perforista*. Santiago: Diamantina Christensen.
- CMM. (2014). *Informe Anual 2014*. México, D.F.: Cámara Minera de México.
- CMM. (2016). *Informe Anual 2016*. Mexico, D.F.: Cámara Minera de México.
- CMM. (2018). *Informe Anual 2018*. México, D.F.: Cámara Minera de México.
- CNA. (2014). Usos del Agua en Infraestructura. *Estadísticas del Agua en México Edición 2014*, 163.
- Díaz, José, (2014) "Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas". Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazan, Honduras.

- Di-Corp. (31 de Marzo de 2019). *Di-Corp: Down to earth business*. Obtenido de Di-Corp: Down to earth business: <https://www.di-corp.com/about>
- Galitskova, Y. (2018). Use of Drilling Muds for Remediation. *XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering*.
- Góngora Pérez, J. P. (2013). Evolución Reciente de la Minería en México. *Comercio Exterior, Vol 63, Num 4*.
- Hartman, H. L. (1987). *Introductory Mining Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Honda. (13 de Mayo de 2019). *Equipos Honda*. Obtenido de Equipos Honda: <https://equiposhonda.com/producto/motobomba-honda-wl20-mfx-de-2-pulgadas-motobomba-de-agua-de-gasolina/>
- INEGI. (21 de Febrero de 2018). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- Kennedy, B. A. (1990). *Surface Mining*. Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Kudaikulova, G. (2015). Rheology of drilling muds. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Lehni, M. (2000). Ecoefficiency: creating more value with less impact. *World Business Council for Sustainable Development*, 32.
- Luhenga, Q. (2014). The Application of Polymer Mud System in Drilling Engineering. *Procedia Engineering*, 230-236.
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Australia: Springer.
- Mavis, J. (2003). Water Use in Industries of the Future: Mining Industry. *U.S. Department of Energy*, 47 - 53.
- McKinstry, H. E. (1977). *Geología de Minas*. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.

- Metcalf, E. (1979). *Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse*. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Monforte García, G., & Cantú Martínez, P. C. (2009). ESCENARIO DEL AGUA EN MEXICO. *CULTURA CIENCIA Y TECNOLOGIA*, 31-40.
- Moon, C., Whateley, M., & Evans, A. (2006). *Introduction to Mineral Exploration*. Carlton, Victoria, Australia: Blackwell Publishing.
- NMX-AA-034-SCFI-2015. (2015). *ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA*. México D.F., México: Secretaría de Economía.
- Prosser, I., Wolf, L., & Littleboy, A. (2011). Water in mining Industry. *CSIRO*, 135 - 146.
- Raymond, R. (1986). *Out of the Fiery Furnace*. Pennsylvania State: The Pennsylvania State University Press.
- Rincón, E., & Ann, W. (2011). CÁLCULO DE INDICADORES DE ECOEFICIENCIA PARA DOS EMPRESAS. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 333 - 345.
- Rodríguez Soto, A. (2015). Exploración de Yacimientos Mediante la Perforación de Sondeos. *I Jornada sobre temas de actualidad en la minería* (págs. 1-41). Madrid, España: Asociación Nacional de Ingenieros de Minas de España; Grupo Especializado en Recursos y Reservas Minerales Española.
- SE. (22 de Febrero de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Gobierno de México:  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/941/GuiaPequenaMineria.pdf>
- SGM. (2017). *Panorama Minero del Estado de Sonora*. Hermosillo, Sonora: Secretaría de Economía.
- Sonora, G. d. (12 de Mayo de 2019). *Secretaría de Economía*. Obtenido de <http://economiasonora.gob.mx/portal/minero>

Sturm, A., & Müller, K. (2001). Standardized EcoEfficiency Indicators. *Ellipson Consultants*, 72.

Villegas R., (2017) “La química de los lodos de perforación ejemplos y aplicaciones en las ciencias de la tierra”. Universidad Nacional Autónoma de México.

Yan, J. N. (2001). Drilling fluid technology. *China university of petroleum*.

## ANEXO 1. BITÁCORA DE BARRENO 1

<b>MAESTRÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES</b>						 <b>UES</b> <small>Universidad Estatal de Sonora La Fuerza del Saber Establece el Destino</small>
<b>ALUMNO: MARTIN ANTONIO QUINTERO COTA</b>						
<b>PRIMER BARRENO 001</b>						
<b>LITROS</b>	<b>METROS</b>	<b>L/M</b>				
<b>200,000</b>	<b>396.2</b>	<b>504.79</b>				
<b>FECHA</b>	<b>TURNO</b>	<b>BARRENO</b>	<b>LITROS</b>	<b>METRAJE</b>	<b>ADITIVOS USADOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
04-may	DIA	001	20,000	17.7	FLOCULANTE(1), CR-650(1)	
04-may	NOCHE	001	20,000	18	CR-650 (2)	SE PERDIO RETORNO
05-may	DIA	001	10,000	30.00	CR-650 (1)	NO RETORNO
05-may	NOCHE	001	20,000	24.00	CR-650(2)	
06-may	DIA	001	20,000	24.00	CR-650 (1)	SE RECUPERO RETORNO
06-may	NOCHE	001	10,000	24.00	CR-650 (1)	
07-may	DIA	001	10,000	30.00		
07-may	NOCHE	001	10,000	30.00	CR-650 (1)	
08-may	DIA	001	10,000	30.00	FLOCULANTE(1), CR-650(1)	
08-may	NOCHE	001	10,000	30.00	CR-650(1)	
09-may	DIA	001	10,000	24.00	CR-650(1)	
09-may	NOCHE	001	10,000	24.00	SISTEM FLOC-360(1), CR-50(1)	
10-may	DIA	001	10,000	27.00		
10-may	NOCHE	001	10,000	24.00	SISTEM FLOC-360(1), CR-50(1)	
11-may	DIA	001	10,000	27.00	CR-650(1)	
11-may	NOCHE	001	10,000	12.50	FLOCULANTE(1), CR-650(1)	FIN DEL BARRENO

## ANEXO 2. BITÁCORA DE CONSUMO BARRENO 2

<b>MAESTRÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLE</b>						 <b>UES</b> <small>Universidad Estatal de Sonora La Fuerza del Saber Planteado en Equipo</small>
<b>ALUMNO: MARTÍN ANTONIO QUINTERO COTA</b>						
<b>SEGUNDO BARRENO 002</b>						
<b>LITROS</b>	<b>METROS</b>	<b>L/M</b>				
<b>50,000</b>	<b>377.75</b>	<b>132.36</b>				
<b>FECHA</b>	<b>TURNO</b>	<b>BARRENO</b>	<b>LITROS</b>	<b>METRAJE</b>	<b>ADITIVOS USADOS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
12-may	DIA	002	-			
12-may	NOCHE	002	10,000	17.7	FLOCULANTE (1) CR-650 (1)	INICIO DEL BARRENO
13-may	DIA	002	-	33.00	CR-650 (1)	
13-may	NOCHE	002	-	33.00	FLOCULANTE (1)	
14-may	DIA	002	-	33.00	CR-650 (1)	
14-may	NOCHE	002	10,000	30.00	CR-650 (1)	
15-may	DIA	002	-	30.00	FLOCULANTE (1) TUBE LUBE (1)	
15-may	NOCHE	002	-	24.00	CR-650 (1)	
16-may	DIA	002	10,000	3.00	CR-650 (1)	
16-may	NOCHE	002		27.00		
17-may	DIA	002	10,000	30.00	CR-650 (1)	
17-may	NOCHE	002				
18-may	DIA	002		3.00	CR-650 (1)	
18-may	NOCHE	002		6.05	FLOCULANTE (1)	
19-may	DIA	002	10000	27.00	CR-650 (1)	
19-may	NOCHE	002		30.00	FLOCULANTE (1)	
20-may	DIA	002		27.00	CR-650 (1)	
20-may	NOCHE	002		24.00		



**ANEXO 3. BITÁCORA DE CONSUMO BARRENO 3 (USANDO SISTEMA DE RECIRCULACIÓN PATENTADO)**

<b>MAESTRÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES</b>						
<b>ALUMNO: MARTIN ANTONIO QUINTERO COTA</b>						
<b>TERCER BARRENO 003</b>						
LITROS	METROS	L/M				
<b>270,000</b>	<b>400.8</b>	<b>673.65</b>				
FECHA	TURNO	BARRENO	LITROS	METRAJE	ADITIVOS USADOS	OBSERVACIONES
18-ago	DIA	003			Bentonita(1), Soda ash(1), Aus plug(1), CR-650(1) y Penetrol(1)	TRASLADO Y ARMADO DE EQUIPO
18-ago	NOCHE	003	40,000	23.25		INICIO DE BARRENO
19-ago	DIA	003	20,000	51.15	Grease(2), Bentonita(1) y CR-650(1)	
19-ago	NOCHE	003	50,000	54.25	CR-650(1)	
20-ago	DIA	003	10,000	27.25	Grease(1)	
20-ago	NOCHE	003	30,000	36.25	CR-650(1)	
21-ago	DIA	003	20,000	39.15	CR-650(1)	
21-ago	NOCHE	003	20,000	33.10	CR-650(1)	
22-ago	DIA	003	10,000	8.05	CR-650(1)	
22-ago	NOCHE	003	20,000	28.00	CR-650(1)	
23-ago	DIA	003	20,000	33.05	CR-650(1) y Tube lube(1)	
23-ago	NOCHE	003	20,000	33.15		
24-ago	DIA	003	10,000	34.15		
24-ago	NOCHE	003				
25-ago	DIA	003				