INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, CIIDIR-UNIDAD DURANGO

APROVECHAMIENTO DE LOS JALES DE LA MINA LA GUITARRA PARA LA MANUFACTURA DE PANELES PREFABRICADOS LIGEROS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO EN LA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA

JOSÉ JAIME PARRA VEJAR

DIRECTOR:

DR. IGNACIO VILLANUEVA FIERRO

CO-DIRECTOR:

DR. EDUARDO SÁNCHEZ ORTIZ

DR. ISAIAS CHAIREZ HERNÁNDEZ

DR. JOSÉ BERNARDO PROAL NÁJERA

CIIDIR DURANGO

VICTORIA DE DURANGO, DGO., JUNIO 2017

SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de **Durango, Dgo.** siendo las **16:40** horas del día **24** del mes de **mayo** del **2017** se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del: **CIIDIR-IPN Unidad Durango** para examinar la tesis titulada:

Aprovechamiento de los jales de la mina La Guitarra para la manufactura de paneles prefabricados ligeros

Presentada por el alumno:

PARRA	**VEJAR**	**JOSÉ JAIME**
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro:

B	1	5	0	9	9	9

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***APROBAR LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Ignacio Villanueva Fierro

DR. IGNACIO VILLANUEVA FIERRO

DR. EDUARDO SÁNCHEZ ORTIZ

DR. JOSÉ BERNARDO PROAL NÁJERA

DR. ISAÍAS CHAIREZ HERNÁNDEZ

DR. JOSÉ MANUEL VIGUERAS CORTÉS

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JOSÉ ANTONIO ÁVILA REYES

CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R
UNIDAD DURANGO
I.P.N.

SIP-13-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 24 de mayo del 2017

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de **CIIDIR-IPN Durango** en su sesión **extraordinaria** No. **2** celebrada el día **10** del mes de **marzo** conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

PARRA	VEJAR	JOSÉ JAIME
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre (s)

Con registro: B 1 5 0 9 9 9

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Aprovechamiento de los jales de la mina La Guitarra para la manufactura de paneles pre-fabricados ligeros.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dr. Ignacio Villanueva Fierro y Dr. Eduardo Sánchez Ortiz

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
El CIIDIR-IPN Unidad Durango
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dr. Ignacio Villanueva Fierro
Aspirante

Dr. Eduardo Sánchez Ortiz
Presidente del Colegio

Ing. José Jaime Parra Vejar

Dr. José Antonio Ávila Reyes

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R
UNIDAD DURANGO
I.P.N.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Durango, Dgo., el día **24** del mes de **mayo** del año **2017**, el que suscribe **José Jaime Parra Vejar** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental**, con número de registro **B150999**, adscrito al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. CIIDIR-IPN Unidad Durango**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Ignacio Villanueva Fierro** y del **Dr. Eduardo Sánchez Ortiz** y cede los derechos del trabajo titulado **"Aprovechamiento de los jales de la mina La Güitarra para la manufactura de paneles prefabricados ligeros"**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones ingjimiparra@gmail.com, ifierro62@yahoo.com y esanchezo@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

JOSÉ JAIME PARRA VEJAR

AGRADECIMIENTOS

A la suerte, que nos mantiene vivos; al amor que nos mantiene alegres; a la esperanza, que nos motiva día con día.

Al Dr. Ignacio Villanueva, por su paciencia y buen ejemplo en el trabajo.

Al Dr. Juan Manuel Vigueras por su amistad.

A la M. C. Mayra Burciaga, por su compromiso y puntualidad.

Al Dr. José Bernardo Proal, por ser un ejemplo de persona.

A los Dres. Isaías Chairez Hernández y Eduardo Sánchez por asesorarme.

A mi esposa Paola Villegas por su comprensión y por estar a mi lado.

A mis hijos, Leonardo y Emiliano Parra por motivarme.

A mis madres, por su ejemplar educación, Guadalupe Vejar Q.P.D. y Socorro Vejar.

CONTENIDO

I. MARCO TEÓRICO 3
1.1 Minería 3
1.2 Minería a nivel mundial 3
1.3 Minería en México 5
1.4 Minería en Estado de México 6
1.5 Mina de Plata La Guitarra 6
1.6 Sustentabilidad en la minería 7
1.7 Residuos de la industria minera 9
1.7.1 Contaminación por partículas de polvo 9
1.7.2 Amalgamiento con mercurio 10
1.7.3 Proceso por cianuración 10
1.7.4 Residuos sólidos de la minería (jales mineros) 11
1.8 Principal normatividad en materia de residuos de la minería 13
1.9 Disposición de residuos de la industria minera 14
1.10 Tratamiento de residuos de la industria minera 15
1.11 Aprovechamiento de residuos de la industria minera 16
1.12 Cemento Portland como medio de absorción de residuos 17
1.13 Fibra de polipropileno 19
1.14 Concreto celular 19
II. JUSTIFICACIÓN 21
III. OBJETIVO GENERAL 22
3.1 Objetivos específicos 22
IV. MATERIALES Y MÉTODOS 22
4.1 Materiales para la manufactura de los PPL 23
4.2 Obtención de los jales 23
4.3 Diagrama de flujo del proceso experimental 24
4.4 Caracterización de los jales 25
4.4.1 Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO_2 25

4.4.2 Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales 26
4.4.3 Proceso de elaboración de los paneles prefabricados ligeros 27
4.5 Diseño de experimentos 31
4.5.1 Superficie de respuesta 31
4.5.2 Análisis Multivariado 33
4.6 Caracterización de los paneles prefabricados ligeros 34
4.6.1 Densidad aparente 34
4.6.2 Conductividad térmica 35
4.6.3 Permeabilidad al vapor de agua 36
4.6.4 Adsorción de humedad y absorción de agua 37
4.6.5 Resistencia a la flexión 38
4.6.6 Costos de producción de los paneles prefabricados ligeros. 39
V. RESULTADOS 40
5.1.1 Resultados de la “Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO2” 40
5.1.2 Resultados de la Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales 40
5.2 Resultados de la Caracterización físico-química de los paneles prefabricados ligeros 40
5.2.1 Resultado de la Prueba de Balance Ácido-Base en los paneles prefabricados ligeros 40
5.2.2 Resultado de Densidad Aparente 41
5.2.3 Resultado de la prueba de Conductividad Térmica de los paneles prefabricados ligeros 42
5.2.4 Resultado de la prueba de Permeabilidad al Vapor de Agua de los paneles prefabricados ligeros 42
5.2.5 Resultado de la prueba de Absorción de Agua y Adsorción de Humedad de los paneles prefabricados ligeros 43
5.2.6 Resultado de resistencia a la flexión de los paneles prefabricados ligeros 44
5.2.7 Resultado de costos aproximados de producción de los Paneles Prefabricados Ligeros 45

5.2.8 Resultados de Superficie de Respuesta 46
5.2.9 Resultado de Análisis Multivariado 51
VI. DISCUSIÓN 59
VII. CONCLUSIONES 65
VIII. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS 66
IX. BIBLIOGRAFÍA 67
X. ANEXOS 76

Anexo 1.- Porcentajes utilizados en el diseño de superficie de respuesta 76
Anexo 2. Cantidades de insumos utilizados en el diseño de superficie de respuesta 77
Anexo 3. Datos para el cálculo de densidad 78
Anexo 4. Datos para el cálculo de la conductividad térmica 79
Anexo 5. Datos para el cálculo de la PVA 80

LISTA DE ABREVIATURAS

∆p: Diferencia de presión de vapor, en Hg

∆T: Gradiente de temperatura

∆x: Espesor del material

A: Área

A: Área de prueba en m2

Ag: Plata

Al2O3: Óxido de aluminio

As: Arsénico

ASTM: American Society of Testing Materials

AVT: Transmisión del Vapor de Agua

Ba: Bario

Be: Berilio

BSR: Bacterias Sulfato Reductoras

Ca: Calcio

Ca2+: Ión calcio

CaCO3: Carbonato de calcio

Cd: Cadmio

CHM: Contenido de humedad absorbido por la muestra en 24 horas (%)

Cr: cromo

Cu: Cobre

CuFeS2: Calcopirita

DA: Densidad del agua (kg/m3)

DAR-LM: Drenaje Ácido de Roca-Lixiviación de Metales

DM: Densidad del material (kg/m3)

EPT: Elementos Potencialmente Tóxicos

Fe: Hierro

Fe1-XS: Pirrotita

Fe2O3: Óxido de hierro

FeAsS: Arsenopirita

FeS2: Pirita

G/t: Pendiente de la línea recta, g/h

G: Cambio de peso (de la línea recta), g

H+: Ión hidrógeno

HCL: Ácido clorhídrico

k: Conductividad térmica

K2O: Óxido de potasio

Kg/m3: Kilogramo sobre metro cúbico

LMP: Límites Máximos Permisibles

m: masa de la muestra

Mg: Magnesio

MgO

NaOH: Hidróxido de sodio

ng/Pa.s.m2: Nanogramo sobre Pascal por presión de saturación de vapor por metro cuadrado

NOM: Norma Oficial Mexicana

PA: Potencial de ácidez

pap: Densidad aparente

Pb: Plomo

PbS: Sulfuro de plomo

PIB: Producto Interno Bruto

PN: Potencial de Neutralización

PPL: Paneles Prefabricados Ligeros

PVA: Permeabilidad al Vapor de Agua

Qcond: Razón de transferencia de calor

R1: Humedad relativa del plato de prueba

R2: Humedad relativa de la cámara

S: Presión de vapor de saturación a temperatura de ensayo en mm Hg

Se: Selenio

SiO2: Óxido de silicio

SO4: Ión sulfato

T: Tiempo en horas

Ti: Titanio

TiO2: Dióxido de titanio

US Perm: Unidad de permeancia

V: Vanadio

V: Volumen de la muestra

Va: Volumen Añadido

Vb: Volumen añadido después de 2 horas

Vc: Volumen añadido después de 22 horas

VCH: volumen de contenido de humedad en (%)

Vf: Volumen Final

W/mK: Vatio sobre metro cuadrado por grado

Zn: Zinc

ZnS: Esfarelita

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Secado y tamizado de los jales 27
Figura 2.- Molde para el vertido de la mezcla 28
Figura 3.- Mezcla de jales, cemento y fibra de polipropileno 28
Figura 4.- Batido de espumante concentrado 29
Figura 5.- Malla de fibra de vidrio 30
Figura 6.- Panel para uso como falso plafón de 61x61 cm. 30
Figura 7.- Probetas experimentales para el diseño de Superficie de Respuesta 33
Figura 8.- Termómetro de infrarrojo Figura 9.- Fuente calorífica 36
Figura 10. Sistema electromecánico de prueba universal 39
Figura 11. Gráfica de Probabilidad Normal para resistencia 46
Figura 12. Gráfica de Probabilidad Normal para Densidad 47
Figura 13. Malla de la superficie de respuesta estimada para la resistencia 49
Figura 14. Malla de la superficie de respuesta estimada para la densidad 49
Figura 15. Superficie de respuesta estimada para resistencia 50
Figura 16. Superficie de respuesta estimada para densidad 50
Figura 17. Gráfico de % espumante vs resistencia a flexión 55
Figura 18. Gráfico de % de agua vs absorción de agua en % masa 55
Figura 19. Gráfico de % cemento vs adsorción de humedad en % masa 56
Figura 20. Gráfico de % cemento vs conductividad térmica W/m*K 56
Figura 21. Gráfico de densidad vs absorción de agua en % masa 57
Figura 22. Gráfico de % espumante vs densidad kg/m^3 57
Figura 23. Gráfico de % Jales vs Densidad kg/m3 58
Figura 24. Gráfico de % jales vs PVA ng/Pa.s.m^2 58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores y unidades de la Superficie de Respuesta..... 32
Tabla 2. Variables dependientes e independientes en Análisis Multivariado. 33
Tabla 3. Elementos analizados en los jales, cantidades encontradas y LMP según la NOM-052-SEMARNAT-2005..... 40
Tabla 4. Potencial de Neutralización, Potencial de Acidificación, pH y porcentaje de humedad de los jales. 40
Tabla 5. Potencial de Neutralización, Potencial de Acidificación, pH y porcentaje de humedad del PPL. 41
Tabla 6. Resultados de Densidad Aparente de los paneles prefabricados ligeros.... 41
Tabla 7. Resultados de Coeficiente de Conductividad Térmica 42
Tabla 8. Resultados de la prueba de Permeabilidad al Vapor de Agua 42
Tabla 9. Resultados de la prueba de Absorción de Agua. 43
Tabla 10. Resultados de la prueba de Adsorción de humedad en porcentaje de masa y volumen. 44
Tabla 11. Resultado de resistencia a la flexión 44
Tabla 12. Costo unitario de insumos 45
Tabla 13. Costos aproximados de producción 45
Tabla 14. Valores óptimos para maximizar resistencia 47
Tabla 15. Valores óptimos para maximizar densidad..... 48
Tabla 16. Resumen estadístico 1er corrida..... 51
Tabla 17. Resumen estadístico 2da corrida 52
Tabla 18. Correlaciones variables independientes y variables dependientes 54
Tabla 19. Correlaciones variables dependientes..... 54

RESUMEN

Se presenta un estudio para la incorporación de jales mineros provenientes de la mina de plata La Guitarra para su utilización en un proceso productivo directo a través de la manufactura de paneles prefabricados ligeros (PPL). Se realizó la caracterización del jal en base a la NOM-141-SEMARNAT-2003, obteniendo como resultado concentraciones de metales pesados dentro de los Límites Máximos Permisibles y Potencial de Acidez (PA) de 2.22 con ausencia total de Potencial de Neutralización (PN), lo que califica a los jales como residuo tóxico. En la manufactura de los PPL se utilizó como materia prima dichos jales, cemento Portland, espumante concentrado, sellador vinílico, fibra de polipropileno, malla de fibra de vidrio y agua. Se fabricaron probetas experimentales con dimensiones de 10″ x 5.5″ y ½″ de grosor. Se determinó el PN de las probetas obteniendo un resultado de 422.5, y una relación de PN/PA > 1.2, lo que significa que las probetas no presentan las características de un residuo peligroso.

Se realizó la caracterización de las probetas como materiales para la construcción, utilizando como referencia la NOM-018-ENER-2011; se evaluaron las características de densidad aparente obteniendo resultados de 540 a 1215 kg/m^3, permeabilidad al vapor de agua de 1131.34 a 4476.99 ng/Pa.s.m^2, conductividad térmica de 0.14 a 0.16 W/mK, absorción de agua y adsorción de humedad en masa de 21.65% a 84.51% y 2.11% a 35.38% respectivamente. De manera adicional se realizó una prueba de resistencia a la flexión obteniendo resultados de resistencia de 61.13 kg a 64.0 kg por cm^2.

ABSTRACT

A study is presented for the incorporation of mining tailings from the silver mine La Guitarra for use in a direct production process through the manufacture of Light Prefabricated Panels (LPP). The characterization of the tailings was done using as reference the NOM-141-SEMARNAT-2003, resulting in concentrations of heavy metals within the Maximum Allowable Limits and Acid Potential (AP) of 2.22 with total absence of Neutralization Potential (PN) that qualifies the tailings as toxic waste.

Portland cement, concentrated foaming, vinyl sealant, polypropylene fiber, Fiberglass mesh and water, were used as raw materials in the manufacture of LPPs. Were fabricated experimental specimens with dimensions of 10 "x 5.5" and ½ ". The PN of the test specimens were measured obtained a result of 422.5 and a PN/PA ratio > 1.2, which means that the specimens do not present the characteristics of a hazardous waste.

The characterization of the test pieces as materials for the construction It was carried out using as reference the NOM-018-ENER-2011; The apparent density characteristics were evaluated, obtaining results of 540 to 1215 kg/m3, water vapor permeability of 1131.34 to 4476.99 ng/Pa.s.m2, thermal conductivity of 0.14 to 0.16 W/mK, water absorption and adsorption of Humidity in mass from 21.65% to 84.51% and 2.11% to 35.38% respectively. In addition, a flexural strength test was performed obtaining yielding resistance of 61.13 kilograms to 64.0 kilograms per cm^2.

INTRODUCCIÓN

La riqueza de los yacimientos minerales de México representa un sector económico significativo para el país, actualmente la industria de la minería se desarrolla de manera más productiva en los estados de Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango y San Luis Potosí (Coll *et al.*, 2002).

Los residuos mineros, también conocidos como tailings (colas), relaves o jales mineros, son el producto de la trituración y molienda del mineral, una vez que se han recuperado los metales de interés a través de procesos físicos y químicos; los jales mineros varían en su composición química y mineralógica (Ramos *et al.,* 2008).

Los jales mineros generalmente contienen sulfuros metálicos residuales como FeS_2, $Fe_{1-X}S$, PbS, ZnS, $CuFeS_2$ y FeAsS, que son fuente de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Gutiérrez *et al.*,2008). A la oxidación de sulfuros se asocia el Drenaje Ácido de Roca-Lixiviación de Metales (DAR-LM), caracterizado por efluentes contaminantes ácidos que poseen generalmente altas concentraciones de metales tóxicos y del ion sulfato en solución (Carrillo *et al.,* 2012).

De manera natural se pueden encontrar en los suelos elementos como carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos, que neutralizan la producción de drenaje ácido y mantienen un pH cercano al neutro; sin embargo en los suelos dónde no se encuentran dichos elementos, pueden existir lixiviaciones de drenaje ácido, que es producido por la oxidación de sulfuros metálicos por acción biótica y/o abiótica (Gutiérrez *et al.,* 2008).

La composición del cemento Portland integra diferentes elementos que pueden funcionar como neutralizadores de la producción de drenaje ácido en los jales, además de estabilizarlos física y químicamente, desempeñando una acción de encapsulamiento y microencapsulamiento de metales pesados (Flores *y* Romero*.,* 2010).

Basados en la posible acción estabilizante de los jales mineros utilizando cemento Portland, propone una alternativa técnica-económica para el aprovechamiento de los jales provenientes de la Mina de Plata La Guitarra, aprovechándolos como materia prima en la manufactura de Paneles prefabricados ligeros (PPL), para ser utilizados como materiales para la construcción.

I. MARCO TEÓRICO

1.1 Minería

La extracción de recursos minerales ha establecido las bases de la economía que relaciona la producción y el consumo; La extracción de materiales se ha utilizado para la fabricación de diferentes objetos o herramientas desde tiempos remotos. Sin embargo, la minería no solo ha sido usada como actividad económica, sino que también ha fomentado un avance tecnológico y metodológico que han llevado a una constante búsqueda en la mejora del uso de los recursos minerales, lo que significan retos en ámbitos legales, científicos, tecnológicos, mercantiles, producción segura y protección al medio ambiente (Lorenzo *et al.,* 2010).

Una explotación minera se puede realizar de dos formas: en la superficie del suelo o bien por debajo de él, esto depende de diferentes parámetros técnicos, por lo que la extracción de mineral se puede clasificar principalmente en minería a cielo abierto y minería subterránea; de igual forma varían los métodos correspondientes dependiendo el tipo de extracción. La minería subterránea se emplea cuando el yacimiento de mineral tiene una profundidad excesiva. Existe una gran cantidad de criterios a considerar para seleccionar el método extractivo y con ello se han desarrollado diferentes esquemas cualitativos que ayudan a seleccionar los métodos más adecuados, tomando en cuenta diferentes variables, como la valoración de la dureza de la roca, espesor, profundidad, geometría del yacimiento y condiciones del terreno, entre otros (Franco *et al.,* 2015).

1.2 Minería a nivel mundial

Se calcula que la extracción de metales y su procesamiento presentó un crecimiento a nivel mundial de 27.6% durante el año 2010, pasando de 1 millón 661mil millones

de dólares a 2 millones 119 mil, aumentando su producción en el año 2011 y 2013 en un 13% aproximadamente (La Jornada Ecológica, 2013).

En el año 2012, China representó el primer lugar como productor de oro a nivel mundial; produjo 15% del total, seguido de Australia con 10% y Estados Unidos con 9%. México fue el principal productor de plata con una producción que representó el 20%, seguido de China con 17% y Perú con 14%. En la producción de cobre, Chile fue el primer productor con 32%, seguido de China con 9% y Perú 8% (Consejo Minero, 2013).

El Gobierno Chino cree que existe un desequilibrio mundial de recursos minerales, por ello, este país se enfoca en la cooperación y acuerdos con otros países para poder satisfacer la demanda de recursos, y así lograr que ambas partes obtengan beneficios. Tomando en cuenta que la economía mundial mantiene un comportamiento dinámico, China presiona en las obras de exploración, extracción y procesamiento de mineral, además de mejorar a través del tiempo la tecnología que aplica y la construcción de mercado (China Mining, 2015).

Por otro lado, Australia es el primer exportador de carbón en el mundo, además de ocupar los primeros lugares en venta de hierro que tiene como destino el mercado Chino. Australia ha destacado históricamente en la aplicación de tecnología en la minería; ejemplo de ello es el desarrollo del método de flotación para la separación de minerales como el hierro y zinc a principios del siglo XX. En Australia existen áreas que representan un reto para la extracción de minerales, lo que ha servido de motivación para la fabricación de equipos, e implementación de procesos y sistemas de última generación, en materia de automatización de la minería, sistemas de seguridad, simuladores, desarrollo de software, entre otros, todo esto con ayuda de diferentes centros de investigación dónde existe la cooperación de empresas privadas, universidades y Gobierno (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2015).

En Estados Unidos, el potencial de explotación se ha visto limitado debido a una estructura legislativa de regulación que limita el desarrollo del sector minero, por lo que frecuentemente la industria manufacturera requiere del abastecimiento de

mineral de otros países en cantidades aproximadas al 50% del que se utiliza. La demanda de minerales aumenta de forma paralela con los avances tecnológicos; por ejemplo, los chips de computadora anteriormente se llegaron a fabricar con 12 diferentes tipos de minerales, actualmente son necesarios para la fabricación de circuitos integrados de alta velocidad y capacidad, 60 diferentes tipos de minerales (National Mining Association, 2013).

1.3 Minería en México

La riqueza de los yacimientos minerales de México, ha representado aspectos históricos importantes en la economía del país, que lo ha colocado en un contexto de extracción de categoría trascendente a nivel mundial. Desde tiempos prehispánicos la minería se realizaba a pequeña escala, explotando diversos minerales que se encontraban en estado nativo como el oro, la plata, cobre, estaño y mercurio (en forma de cinabrio) (Coll *et al.*, 2002). En México, la minería despliega actualmente una división representada por una clasificación que se le puede asignar en base a su producción; Las empresas mineras se clasifican en las siguientes categorías: 1) Gran minería, que proporciona el 84.1 %, 2) Mediana minería que aporta el 13 % y 3) Pequeña minería que aporta solo el 2.9 % del valor total nacional de extracción de metales (González y Camprubí, 2010).

Los estados con mayor participación minera son Sonora, con 24.89% del valor total de la minería nacional; Zacatecas con 21.85%, Chihuahua con 12.22%; seguido por Durango con 6.94%; San Luis Potosí con 5.18%. Estos cinco estados suman el 71.1 % del valor total de la producción minera nacional (Secretaría de Economía, 2013). En 2015, el PIB de la minería llegó a 805 680 millones de pesos, que equivale a un 4.8% del PIB (INEGI, 2015).

1.4 Minería en Estado de México

La actividad minera en el Estado de México comenzó con la llegada de los españoles. En 1529 se descubrieron las primeras minas en la región de Zacualpan, posteriormente sobresalieron las regiones de Amatepec y Tlalaya dónde se descubrieron vetas con altos contenidos de oro. Algunas de las primeras compañías que comenzaron a explotar los recursos en estas regiones, fueron la compañía el Oro Mining y Esperanza Mining Co. en 1893, dónde produjeron grandes cantidades de oro, además de la Minera Las Dos Estrellas en 1898, que provenía de capital francés.

A pesar que la producción de la minería metálica disminuyó al término de la segunda guerra mundial, en 1991 comenzó nuevamente la explotación de nuevas minas como Tizapa en municipio de Zacazonapan, El porvenir de Zacualpan en antigua Campana de Plata, Real de Belem en Sultepec y La Guitarra en Temascaltepec. Existen también las regiones mineras, que agrupan los distr4itos y zonas mineras por su tipo de yacimiento y mineralización, como la región del oro-Tlalpujahua, Temascaltepec e Ixtapan del Oro, dónde se extraen diferentes minerales como oro, plata, plomo, cobre, zinc y cadmio (Secretaría de Economía, 2014).

1.5 Mina de Plata La Guitarra

La Mina La Guitarra pertenece al grupo First Majestic Silver Corp., la propiedad se ubica aproximadamente a 130 km del Estado de México. La superficie total de la propiedad abarca 397 km cuadrados y tiene más de 15 km de longitud de perforación. En el año 2013, obtuvieron una producción de mineral procesado de 171,662 toneladas, con una recuperación del 84%; produjeron un total de 709,002 Onzas de Plata y 6,466 Onzas de Oro; desarrollaron una mina subterránea con una

longitud de 5 408 m y una perforación al diamante de 11.673 m (First Majestic Silver Corp. 2015).

1.6 Sustentabilidad en la minería

La obtención de minerales se obtiene a través de la minería y de diferentes métodos de procesamiento, dependiendo el tipo de mina y del mineral. Sin embargo el conocimiento tecnológico para llevar a cabo los métodos de procesamiento no son suficientes para asegurar que las organizaciones se encuentren en condiciones estables en general; es también necesario que los métodos administrativos funcionen correctamente de forma paralela con una manera competitiva en la búsqueda de reducción de costos de producción (Petter *et al.,* 2008), además de la relación con aspectos éticos y de sustentabilidad, que han llevado a darle mayor peso a la responsabilidad social en los objetivos tradicionales de generar valor para el consumidor. Todo esto ha llevado a la integración de resultados económicos, sociales y ambientales, que constituyen las bases de una Responsabilidad Social Corporativa (RSC) (Vintró y Comajuncosa, 2010).

El concepto de sustentabilidad se ha comportado de forma dinámica a través de la historia; Actualmente el concepto más aceptado se refiere a que las actividades humanas que se realizan en el presente, no comprometan la disponibilidad de recursos naturales de las generaciones futuras. Algunos autores han indicado que el concepto de sustentabilidad no puede ser aplicado a la minería, desde el punto de vista de la extracción, debido a que los yacimientos de minerales pueden ser agotados. Por ello, en el caso de la minería la sustentabilidad aplica reciclando minerales que ya han sido transformados, con el objetivo de mitigar la explotación, los daños ambientales, o bien, reducir consumos de energía en los procesos, incrementar la productividad, entre otras acciones que pueden amortiguar los impactos generados (Molina *et al.,* 2010). Es importante mencionar que con el paso del tiempo se ha incrementado la presión para regular la problemática por residuos y

contaminación producto de la actividad minera, además de la salud en el trabajo y particularmente en actividades dónde el peligro es significativo. Todo esto en conjunto con la demanda de gobiernos y sociedad, han significado el crecimiento de la preocupación en general por este tipo de problemáticas relacionadas con la minería (Vintró y Comajuncosa, 2010).

La industria minera es en esencia próspera y ofrece una gran oportunidad de empleo, aunque de forma paralela genera impactos ambientales negativos y acumulativos, así como sociales en comunidades que exigen prácticas responsables en sus procesos. Aunque muchas compañías mineras han manifestado un compromiso con los valores de la sustentabilidad, hoy en día la percepción pública de la responsabilidad social y ambiental se mantiene pobre (Botin, 2010).

El agua y la energía han representado desafíos a lo largo del tiempo en la industria minera. Se les puede vincular de una forma directa ya que para el tratamiento de agua residual es necesaria la entrada de energía o químicos, lo que también representa un consumo de energéticos (The Australasian Institute Of Mining And Metallurgy, 2012). Desde el punto de vista energético y por lo tanto, ambiental, una mina subterránea es más eficiente que una mina a cielo abierto. Existen también diferentes variables que influyen en el aprovechamiento de energía, como la tecnología disponible para la actividad minera, equipo apropiado, distancias cortas de la mina hacia los sitios de procesamiento del mineral, infraestructura de calidad, características del mineral, características y tamaño del sitio, además de los métodos de procesamiento (Torre, 2011). El criterio respecto a los objetivos de una economía sustentable, se basa en mantener una alta tasa de crecimiento económico utilizando los recursos de la manera óptima posible (Rodríguez, 2010).

1.7 Residuos de la industria minera

1.7.1 Contaminación por partículas de polvo

Existen diferentes problemáticas por la producción de polvo en la actividad minera. Una de ellas se presenta en las minas de carbón, dónde pueden ocurrir explosiones debido a una gran acumulación de polvo de carbón (Baquero y Blandón, 2012). La composición de los contaminantes que se encuentran en el aire pueden ser orgánicos, inorgánicos, e inclusive una compleja mezcla de ambos. La minería y el procesamiento del mineral, producen contaminantes por partículas en el ambiente que son elementos complejos, de varios orígenes y tamaños, entre ellos elementos traza, que representan una amenaza importante para la salud del ser humano (Kumar *et al.,* 2012). Las enfermedades como la silicosis o neumoconiosis, se puede producir en los trabajadores de la minería debido a la acumulación de sílice y silicatos en los pulmones, provocando un aumento significativo en el riesgo de contraer enfermedades como la tuberculosis, bronquitis crónicas, infecciones respiratorias diversas, asma, siderosis o siderosilicosis (Belmonte *et al.,* 2010).

En la explotación minera subterránea, el riesgo en la salud de los trabajadores se limita a las personas que entran a la mina, sin embargo, en la extracción a cielo abierto, la contaminación ambiental por polvo que procede de los barrenados y del flujo de los vehículos que transportan los materiales, se disipa no sólo a todos los trabajadores en el sitio, sino a las comunidades aledañas al sitio de extracción (Belmonte *et al.,* 2010). El polvo que se genera por la acción del viento en las presas de jales dónde se almacenan los residuos de la industria minera, representan también problemas para la salud humana, incluso después de haber abandonado las actividades productivas en la mina (Sosa *et al.,* 2006).

1.7.2 Amalgamiento con mercurio

Algunas de las principales actividades del ser humano que liberan grandes cantidades de metales pesados en el ambiente, son el uso de combustibles fósiles, minería y fundición de metales, producción de químicos, incineración de contaminantes y el uso de mercurio en la industria minera. El proceso de amalgamiento con mercurio comúnmente llamado “proceso de patio” fue introducido a Latinoamérica a principios de 1550, y consiste en adicionar mercurio elemental al mineral de plata u oro, con la finalidad de conseguir una amalgama del metal de interés como producto final. Este proceso quedó obsoleto a principios del siglo XX y fue reemplazado por el uso de cianuro (Rosiles et al., 2006). Sin embargo, existe contaminación por mercurio desde tiempos coloniales; la técnica de amalgamiento fue utilizada principalmente en el estado de Zacatecas entre 1570 y 1820, dónde los residuos que se produjeron fueron dispersados por las corrientes de ríos del lugar (Olmos *et al.,* 2008). En la actualidad la minería artesanal se realiza con herramientas y procesos técnicos rústicos dónde todavía se utiliza el mercurio (Español, 2012). La exposición al mercurio, incluso en bajas cantidades, se relaciona a intoxicaciones crónicas y agudas, resultando en enfermedades que incluyen daños neurológicos, ataques cardiacos, daño en el sistema nervioso central, daños en el sistema renal y autismo (Hernández *et al.,* 2013).

1.7.3 Proceso por cianuración

La cianuración es un proceso electroquímico de disolución del oro, plata y algunos otros componentes que se pueden encontrar en un mineral geológico mineralizado. Se utiliza una solución alcalina de cianuro, que forma aniones complejos de oro, que se comportan estables en soluciones acuosas. Este proceso implica una serie de reacciones que ocurren en la superficie del sólido, por lo que se afirma que el principio básico de la cianuración es un medio donde las soluciones alcalinas débiles

tienen una acción directa preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral (Romero *et al.,* 2009). En yacimientos epitermales se utiliza en menor escala la cianuración para la recuperación de oro y plata principalmente, recuperando sólo el 5% del volumen total procesado, el resto del material se deposita en presas de jales (Siebe *et al.,* 2004). El uso de cianuro, ácido sulfúrico y nitratos, entre otros elementos o sustancias que se utilizan para el procesamiento de los minerales, representan fuentes de contaminación en aguas superficiales y aguas subterráneas, si es que estos tóxicos llegasen a ser liberados sin ningún tipo de control en cuerpos de agua. El riesgo potencial en la liberación de estos elementos, dependen de las condiciones específicas del sitio, el diseño y operación de la extracción del mineral, del procesamiento, gestión de residuos, calidad de las medidas de mitigación y aspectos ambientales como el clima y la cercanía de los posibles receptores (Oblasser y Chaparro, 2008).

Generalmente los efluentes que son producto de la recuperación de la plata presentan compuestos complejos como tiosulfato ($S_2O_3^{-2}$) o cianuro (CN^-), por lo que no pueden ser descargados en un sistema de aguas residuales domésticas sin recibir ningún tipo de tratamiento. Se han desarrollado diferentes estudios para la recuperación de plata reduciendo los niveles de contaminación, a través de diferentes procesos como cementación, recuperación electrolítica y resinas de intercambio iónico; sin embargo dichos procesos presentan limitantes técnicas relacionadas con el porcentaje de recuperación de plata (Roca *et al.,* 2012).

1.7.4 Residuos sólidos de la minería (jales mineros)

Los residuos mineros, también conocidos como tailings (colas), relaves o jales mineros, son el producto de la trituración y molienda del mineral, una vez que se han recuperado los metales de interés a través de procesos físicos y químicos; los jales mineros varían en su composición química y mineralógica (Ramos *et al.,* 2008). Generalmente los jales mineros contienen sulfuros metálicos residuales como pirita

(FeS_2), pirrotita ($Fe_{1-X}S$), sulfuro de plomo (galena PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita ($CuFeS_2$) y arsenopirita (FeAsS), que son fuente de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Gutiérrez *et al.*,2008). A la oxidación de sulfuros se asocia el Drenaje Ácido de Roca-Lixiviación de Metales (DAR-LM), caracterizado por efluentes contaminantes ácidos que poseen generalmente altas concentraciones de metales tóxicos y del ión sulfato en solución (Carrillo *et al.,* 2012). Estos elementos potencialmente tóxicos, pueden llegar a estar presentes en jales mineros y representan un riesgo al medio ambiente debido a que existe la posibilidad de lixiviación, lo que causaría la incorporación a cuerpos de agua, además de la alteración a otros ecosistemas por su dispersión a través del viento (Ramos *et al.,* 2008). En las zonas mineras dónde el clima que predomina es árido o semiárido, la contaminación se da por dispersión eólica y en climas húmedos generalmente se presenta una dispersión hídrica (Romero *et al.,* 2015). De acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT-2013, los jales aumentan su peligro potencial en el medio ambiente, en función del incremento del potencial de lixiviación de metales o elementos tóxicos solubles en agua (Godínez *et al.,* 2012).

El drenaje de corrientes de aguas ácidas, se genera por la oxidación de los sulfuros metálicos y se caracterizan por tener valores de pH bajos además de altas concentraciones de EPT que al transportarse pueden causar grandes alteraciones al medio ambiente, contaminando suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Gutiérrez *et al.,* 2008).

Para que se lleve a cabo la oxidación de los elementos presentes en los jales, es necesario que contengan sulfuros metálicos reactivos y que existan las condiciones climáticas necesarias como aire o humedad, por ello, la oxidación frecuentemente es muy limitada durante la operación del depósito; la oxidación se puede presentar al terminar la acumulación de jales, si la porosidad permite la difusión de oxígeno atmosférico. Es importante mencionar que no siempre se produce drenaje ácido por la oxidación de los sulfuros metálicos, debido a que es necesario que la capacidad de neutralización por minerales como carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos, sea superada por los minerales productores de ácidos (sulfuros metálicos), en caso

contrario, se consumirá toda la acidez generada y las soluciones que drenen del depósito de jales, tendrán un pH cercano al neutro (Gutiérrez *et al.,* 2008).

La acidez generada es a consecuencia de la pirita, que es el sulfuro que se puede encontrar en mayores cantidades en una veta. La oxidación de la pirita es un proceso complejo en dónde pueden intervenir factores mineralógicos y microbiológicos; la oxidación por bacterias se da principalmente por la especie *Acidiothiobacillus ferrooxidans*. La tasa de oxidación por microorganismos es más rápida de 1 a 5 veces que la oxidación abiótica dónde el agente oxidante es el oxígeno (Siebe *et al.,* 2004).

1.8 Principal normatividad en materia de residuos de la minería

De acuerdo con la SEMARNAT (2014), se citan las principales Normas Oficiales Mexicanas aplicables al sector minero, aunque también pueden aplicar aquellas normas que se enfocan en otros temas como agua, emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos, entre otras.

Para la regulación de obras de sistemas de lixiviación de oro, plata o cobre, así como la construcción de presas de jales:

- NOM-155-SEMARNAT-2007, que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.

- NOM-159-SEMARNAT-2011, que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

- NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.

Normas Oficiales Mexicanas para la disposición de los residuos mineros:

- NOM-157-SEMARNAT-2009, establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

- NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

- NOM-133-SEMARNAT-2000, Protección Ambiental- Bifenilos Policlorados (BPC) Especificaciones de Manejo.

- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

1.9 Disposición de residuos de la industria minera

La disposición final de los residuos que se generan en la industria minera, representa impactos significativos al medio ambiente, entre ellos, la perdida de cobertura vegetal, erosión eólica e hídrica de los depósitos con estructuras deficientes, la dispersión de sustancias tóxicas en el ambiente, la generación de efluentes con pH bajos y metales pesados por la exposición de minerales de los yacimientos a

condiciones oxidantes. Algunos métodos de construcción de presas de jales que se han aplicado en México, son el depósito subaéreo de lodos, dónde se drena el agua y se retienen los materiales sólidos; en zonas costeras se ha realizado el depósito de los materiales sólidos en aguas profundas, aisladas de la presencia de oxígeno (Siebe *et al.,* 2004). Los residuos de la industria minera representan fuentes considerables de contaminación, debido a que los residuos que produce, generalmente ocupan grandes superficies terrestres dónde suelen ser almacenados (Belmonte *et al.,* 2010).

1.10 Tratamiento de residuos de la industria minera

Existen diferentes alternativas para el tratamiento de las áreas afectadas por los residuos de la minería. Una de las técnicas empleadas para la mitigación de los impactos ambientales es la fitorremediación, que consiste en el uso de plantas para poder degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados y compuestos orgánicos en el suelo, basándose en procesos que ocurren naturalmente dónde las plantas y microorganismos de la rizósfera degradan y adsorben contaminantes orgánicos e inorgánicos (Morales *et al.,* 2016).

El empleo de microorganismos representa otra alternativa para el tratamiento de los jales mineros contaminados por cianuro, implementando bacterias sulfato reductoras (BSR) que producen sulfuro de hidrógeno que reacciona con los sulfatos en solución produciendo sulfuros de metal que son estables y pueden precipitar, además de otros microorganismos con capacidad de degradar cianuro. Las bacterias sulfato reductoras también se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales contaminadas por metales y en ecosistemas de humedales para el tratamiento de aguas ácidas (Hurtado y Berastain, 2012).

Una solución al problema de generación de aguas ácidas de los efluentes que produce la industria minera que provienen de los procesos metalúrgicos de flotación,

es el tratamiento con dolomita. La dolomita es un mineral bastante común entre las rocas sedimentarias continentales y marinas. La remediación de los efluentes metalúrgicos se logra mediante las reacciones químicas espontáneas y simultáneas de neutralización, precipitación y adsorción de los iones metálicos disueltos de cobre, que se producen durante la agitación de la mezcla (Flores *et al.,* 2010).

1.11 Aprovechamiento de residuos de la industria minera

En todo el mundo la industria minera produce una gran cantidad de residuos y su disposición representa grandes desafíos desde el punto de vista económico y medio ambiental. Por ello es importante una visión integral en el desempeño de las actividades mineras, que incluya actividades de remoción y restauración de sus residuos, en lugar de la generación de materiales peligrosos. Se han utilizado residuos de la minería del yeso y cal como estabilizantes para mejorar las propiedades de bloques de tierra comprimida, ya que por sí solos, los bloques presentan desventajas por sus bajas propiedades mecánicas y resistencia al daño por el agua. De esta manera se aprovechan los jales y se incorporan a procesos productivos (Ríos *et al.* 2014). Así mismo, se han aprovechado cenizas volantes que previamente se utilizaron para la precipitación de metales contenidos en drenajes ácidos de la industria minera, residuos generados en la extracción del carbón y jales de la extracción primaria del cobre para la síntesis de zeolitas, que sirven como material catalizador y separador de gases (Solís *et al.,*2015).

Existen minerales refractarios que no permiten recuperaciones de oro superiores al 70 u 80% por métodos de cianuración convencionales, incluso después de haber realizado una molienda muy fina. Esto se debe a diversas causas, entre ellas la oclusión o atrapamiento de partículas submicroscópicas de oro en la matriz de sulfuros, lo que impide el contacto entre el cianuro y el mercurio, consumo excesivo de cianuro, limitación de oxígeno, revestimiento de la superficie de las partículas de oro, entre otros factores que limitan la disolución. El 20 ó 30% de oro que queda

atrapado, se desecha como jale, por lo que se han realizado investigaciones para la obtención de metales preciosos a partir de estos residuos (Romero *et al.,* 2009).

Flores y Romero (2010) realizaron un estudio para la aplicación de un valor agregado de manera directa para el reúso de los jales mineros en la fabricación de ladrillos y baldosas. Realizaron una caracterización de los jales, determinando que su naturaleza era polimetálica sulfurada, con altos contenidos de metales pesados como cobre, plomo, zinc, hierro, cadmio y arsénico; también se encontraron altos contenidos de sulfuros tales como galena, esfalerita y pirita. Ejecutaron un procedimiento de encapsulamiento y microencapsulamiento con el fin de convertir los metales pesados a una forma inerte y segura. A través de diversas pruebas de toxicología determinaron que el producto final no representa peligro como contaminante. En países como Colombia y Chile, se han elaborado materiales como el ladrillo y baldosas, usando como materiales las escorias de la industria de la fundición.

1.12 Cemento Portland como medio de absorción de residuos

El cemento Portland presenta características especiales que pueden ser aprovechadas para la estabilización de contaminantes generados por diferentes industrias, ya sea utilizando los residuos en los procesos de elaboración del cemento o como adición en las mezclas que se realizan para obtener el concreto. La estabilización y fijación de los contaminantes utilizando cemento Portland se sustenta principalmente en dos factores: 1) La encapsulación física por la inmovilización de partículas por el endurecimiento de la mezcla y 2) La estabilización química, que en los metales actúa a través de la inmovilización de iones por los componentes de silicio; Con base a esto, el proceso de estabilización y solidificación con cemento Portland puede ser una buena opción para mitigar los efectos de contaminantes que generan lixiviados y que representan focos de contaminación cuándo se realiza su confinamiento (Torres *et al.,*2012).

El cemento Portland está constituido principalmente por los siguientes elementos:

- Alita (C3S) que es silicato cálcico, el cual al reaccionar con el agua, forma silicato de calcio hidratado o tobermorita gel (CSH) además de hidróxido de calcio.

- Belita (C2S), silicato dicálcico, que de igual manera al entrar en contacto con el agua se convierte en tobermorita gel e hidróxido de calcio.

Estos dos compuestos generan la resistencia mecánica por lo que son elementos imprescindibles para en el cemento y la elaboración de concretos. Así mismo forman el hidróxido de calcio también conocido como portlandita, que se encarga de mantener el pH alcalino, que protege los hormigones de la corrosión.

Otros elementos del cemento Portland son la celita (C3A), aluminato de calcio que al hidratarse se convierte en aluminato de calcio hidratado y aluminato tetracálcico (C4AF), sin embargo hacer una caracterización más completa del cemento presenta varias limitaciones debido al tamaño y formas de las partículas, además de las diferentes multifases que presenta (Giraldo y Tobón, 2006).

Los diseños de mezclas para obtener como producto final un concreto de buena calidad, se basa en calcular las cantidades óptimas de cemento, agua y agregados (los más comunes son arena, grava y/o rocas trituradas), un ejemplo general de las proporciones utilizadas son: 14.6 % de cemento, 7.3 % de agua y 78.0% de agregados. Durante el proceso de endurecimiento del concreto, se lleva a cabo una reacción química entre el cemento y el agua (hidratación), entre los primeros 3 y 7 días, sin embargo puede llevar más tiempo hacer reacción algunas partículas de cemento, por lo que es de vital importancia mantener las condiciones necesarias de humedad y temperatura para la hidratación del cemento (Salamanca, 2001)

1.13 Fibra de polipropileno

La fibra de polipropileno es un polímero termoplástico que es obtenido de la polimerización de propileno; presenta diferentes usos, entre ellos producir empaques de alimentos, tejidos y como refuerzo secundario de concretos (Ríos y San Bartolomé, 2013) y morteros, reduce la generación de grietas del concreto cuándo se encuentra en proceso de hidratación y en estado endurecido (Sikafiber, 2010). Las fibras sintéticas pueden provenir también de otros materiales como acrílicos, aramida, carbón, nylon poliéster y polietileno. Existe controversia en cuanto al uso de las fibras de polipropileno, ya que algunos estudios han arrojado resultados de reducción en la resistencia a la compresión en el concreto, mientras que aumentan ligeramente la resistencia a la flexión; sin embargo otros autores han obtenido como resultado incrementos en la resistencia a la compresión; no se han determinado objetivamente los elementos o cantidades máximas o mínimas de adición de fibra de polipropileno, sino que puede existir influencia de otros factores, por lo que no se ha definido las proporciones generales adecuadas en su uso (Dávila *et al.,* 2011), así mismo su aplicación en el concreto celular carece de estudios que sustenten sus ventajas y desventajas a nivel microestructural. Aunque existen fibras de polipropileno comerciales fabricadas específicamente para su adición al concreto, también se ha utilizado tereftalato de polietileno (PET) y caucho triturado para mejorar la ductilidad, tenacidad y resistencia del concreto celular, lo que significa una ventaja económica y ambiental (Panesar, 2013).

1.14 Concreto celular

La industria de la construcción tiende a cambiar en base a los requerimientos sustentables que demanda la sociedad, buscando adaptarse ambiental, económica, y socialmente a las necesidades actuales (Vélez, 2010). El concreto celular es un material reforzado y ligero que sirve para elaborar bloques o paneles prefabricados

con los que se pueden construir muros o plafones; puede ser elaborado con materiales contenidos en el concreto común, sin embargo la diferencia en la preparación, es la adición de un agente espumante o expansivo (Fernández *et al.,* 2007), que genera burbujas de aire dentro de la mezcla, las cuales le dan características al concreto celular de aislante térmico y acústico, además de aumentar la resistencia al fuego del material. Existen numerosas ventajas en la utilización de concreto celular, como ahorro de energía por sus características termoaislantes, reducción de costos en materiales y mano de obra, además de contribuir con la construcción de viviendas a costos más accesibles (Alcocer *et al.,* 2013). El agente espumante o expansivo puede ser obtenido a partir de una base de proteína o una base sintética, y es el encargado de crear vacíos de aire desde un 10% hasta un 70 % en la mezcla, sin embargo entre menor es la densidad del producto, también disminuyen sus propiedades de resistencia y durabilidad, representando una limitación en cuánto a su aplicación. Los espumantes sintéticos o los que provienen de proteínas animales, reducen la tensión superficial del soluto, lo que da lugar a la formación de burbujas de aire estables. Los espumantes concentrados sintéticos son sustancias anfipróticas y altamente hidrofílicas, por lo que fácilmente se disuelven en agua produciendo burbujas de aire. Los espumantes provenientes de proteínas crean burbujas de aire como resultado de la degradación de las proteínas, debido a la ruptura del enlace peptídico de proteínas grandes, formando moléculas hidrofóbicas, reduciendo la tensión superficial y creando enlaces de hidrógeno entre los grupos moleculares, creando burbujas de aire estables (Panesar, 2013).

II. JUSTIFICACIÓN

Desde tiempos históricos, la explotación de minerales ha dejado marcas de contaminación que hoy en día aún se encuentran en el medio ambiente. La industria de la minería en México, desempeña un papel económico importante para el país, sin embargo, de forma colateral se producen grandes cantidades de residuos que representan un peligro potencial de contaminación para el medio biótico y abiótico. El confinamiento de los residuos sólidos de la minería (jales), es una opción poco factible desde el punto de vista ambiental, debido a que los elementos contaminantes presentes se encuentran vulnerables a la dispersión por acción eólica o hídrica, además de las grandes extensiones de terreno requeridos. Actualmente la explotación de cualquier recurso representa desafíos en la mejora de sus aspectos productivos de forma integral con el medio ambiente, lo que significa la búsqueda de alternativas sensibles ante la crisis que presenta la degradación de los ecosistemas. Con base al problema planteado, es necesario buscar opciones prácticas al confinamiento de los jales de la minería; Por el contenido de partículas de tamaños muy finos presentes en los jales, alto contenido de arena, se pueden aprovechar para la elaboración de materiales para la construcción como paneles prefabricados ligeros (PPL) para emplearlos como falso plafón y muros con lo que se reduce la acumulación de jales en las minas, obteniendo ganancias económicas hasta ahora no consideradas en la minería.

III. OBJETIVO GENERAL

Aprovechar los jales que genera la industria minera, para manufacturar paneles prefabricados ligeros que se puedan utilizar como materiales para la construcción a fin de reducir la acumulación de estos materiales y poder evitar la generación de drenaje ácido, así como la dispersión de metales pesados en el ambiente.

3.1 Objetivos específicos

- ✓ Realizar una caracterización de los jales de la Mina de Plata La Guitarra, para evaluar su peligrosidad de acuerdo a la toxicidad y reactividad que puedan presentar.

- ✓ Definir un procedimiento para la fabricación de paneles prefabricados ligeros utilizando los jales como materia prima.

- ✓ Realizar la caracterización física de los paneles prefabricados ligeros de acuerdo a la normatividad nacional.

- ✓ Evaluar la toxicidad por metales pesados y reactividad a la producción de drenaje ácido de los paneles prefabricados ligeros.

- ✓ Calcular los costos de producción de los paneles prefabricados ligeros.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del estudio integra el aprovechamiento de los jales mineros como materia prima para la elaboración de PPL, que pueden ser utilizados como muros y plafones, entre otros usos.

Es necesario llevar a cabo la estabilización de los jales, ya que pueden contener metales pesados o ser productores potenciales de ácido sulfúrico (Carrillo *et al.,* 2012). Esto se puede lograr a través de la fijación química utilizando aglomerantes o cemento (Flores *et al.,* 2010).

4.1 Materiales para la manufactura de los PPL

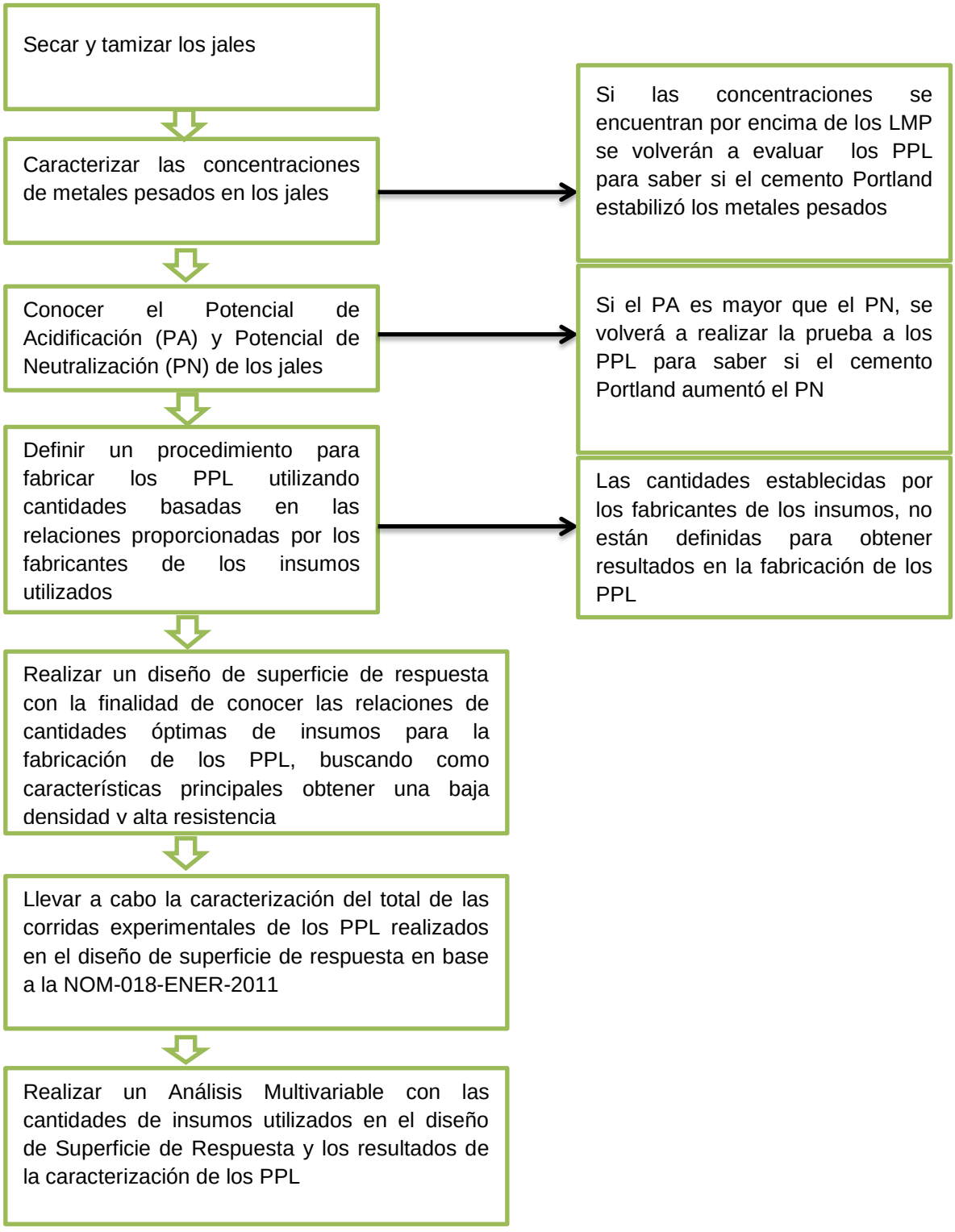
Los materiales a utilizar para la manufactura de los paneles prefabricados ligeros son los siguientes:

- Jales provenientes de la Mina de Plata La guitarra
- Cemento Portland
- Fibra de polipropileno
- Agente espumante concentrado
- Agua
- Sellador vinílico
- Malla de fibra de vidrio

4.2 Obtención de los jales

Los jales fueron recolectados de la Mina de Plata La Guitarra ubicada en el histórico distrito minero de Temascaltepec, en estado de México, con coordenadas geográficas en latitud norte 2 108 400 y Latitud Este 381 600. La mina se encuentra aproximadamente a 130 km al suroeste de la Ciudad de México. La Guitarra se encuentra dentro de la Sierra Madre Occidental, en una región caracterizada por una histórica actividad volcánica (First Majestic Silver Corp. 2015).

4.3 Diagrama de flujo del proceso experimental



4.4 Caracterización de los jales

Para realizar la caracterización de los jales, se utilizó como referencia la **NOM-052-SEMARNAT-2005**, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos y la **NOM-141-SEMARNAT-2003**, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.

Para evaluar la peligrosidad del jal se llevó a cabo la "Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO_2" y la "Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales". Los análisis se realizaron en laboratorios certificados por parte del grupo First Majestic.

4.4.1 Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO2

Para determinar la peligrosidad de los jales en base a su toxicidad se utilizó la prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO_2 atmosférico dónde el resultado obtenido es una solución acuosa que se somete a una cuantificación de metales y metaloides a través de los métodos de "Espectroscopia de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma" y "Métodos de absorción atómica" (NOM-141- SEMARNAT-2003).

Para identificar los metales en solución se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica de haz sencillo (puede ser con haz doble) con un monocromador con rejilla de difracción, un detector fotomultiplicador y una ventana ajustable, con intervalos de longitud de onda de 190 a 180 nm y para determinar los elementos traza presentes

en los jales, se utilizó La espectroscopia de emisión por plasma acoplado por inducción (ICP). Cabe señalar que las puebas se realizaron por parte de la empresa "**First Majestic"** en un laboratorio certificado.

4.4.2 Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales

Para determinar la peligrosidad de los jales en base a su potencial de generación de ácido sulfúrico, se hizo conforme a la NOM-141- SEMARNAT-2003 dónde describe la "Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM-ABA)", propuesta por Lawrence y Wang (1997). La prueba se basa en determinar el potencial de neutralización de los jales, haciendo una medición cualitativa de los carbonatos que reaccionan con HCl, calificando el grado de reacción de neutralización de los carbonatos como nulo, bajo, moderado o fuerte; en base a la calificación se adiciona más HCl y finalmente se titula la solución con NaOH obteniendo como resultado los datos necesarios para desarrollar las siguientes ecuaciones:

$$V_f = V_a + V_b + V_c \quad (\text{Ec. } 1)$$

Dónde (V_a, V_b y V_c), son los volúmenes en mL añadidos a las diferentes mezclas realizadas

Potencial de Neutralización en kilogramos de carbonato de calcio por tonelada de jales

$$PN = \frac{(Vf) - (0.1 \times NaOH)}{peso\ de\ la\ muestra\ (g)} \quad (\text{Ec. } 2)$$

4.4.3 Proceso de elaboración de los paneles prefabricados ligeros

- Los jales provenientes de la Mina de Plata La Guitarra, generalmente contienen un alto grado de humedad, por lo que es indispensable secarlos al sol, para posteriormente pasarlos por un tamiz de 2.5 mm debido al tamaño de partícula que se maneja y así obtener un agregado fino.

Figura 1.- Secado y tamizado de los jales

- Se fabricaron moldes rectangulares de 10” x 5.5”, con ángulo de 1/2” para realizar el vertido de la mezcla y fabricar probetas experimentales, se perforaron y unieron en sus extremidades con tornillos de ¾” y se cubrieron sus lados interiores con grasa de uso industrial, con la finalidad de evitar que la mezcla se pegue. La finalidad de los moldes rectangulares (figura 2) fue llevar a cabo un diseño experimental de superficie de respuesta, para encontrar las proporciones óptimas de materiales que aportaran los resultados esperados en resistencia y densidad.

Figura 2.- Molde para el vertido de la mezcla

- El proceso de elaboración de los PPL comienza con la medición de las cantidades a utilizar de los diferentes elementos que conforman la mezcla. Una vez definidas las cantidades en base a las densidades deseadas, el cemento Portland y jales, se mezclan en seco con la fibra de polipropileno para obtener una mezcla homogénea.

Figura 3.- Mezcla de jales, cemento y fibra de polipropileno

Posteriormente se agrega el agua y el sellador acrílico que tiene la finalidad de reducir la permeabilidad al vapor de agua y se comienza a batir la mezcla hasta formar una pasta.

De manera independiente se mezcla el espumante concentrado con agua y se revuelve con una batidora eléctrica o con la inyección de aire hasta formar una espuma que se mantenga constante en volumen.

Figura 4.- Batido de espumante concentrado

Cuando se tiene la espuma se adiciona y se mezcla con el cemento, jales y fibra de polipropileno y se mantiene batiendo hasta lograr una mezcla homogénea, la cual será vertida en los moldes utilizados, para posteriormente concluir el proceso con la colocación de la malla de fibra de vidrio.

Figura 5.- Malla de fibra de vidrio

Después de 24 horas transcurridas, es imprescindible llevar a cabo la humectación del PPL con la finalidad de continuar haciendo reaccionar todas las partículas de cemento Portland (proceso de curación) con los demás elementos del PPL durante los siguientes tres días. Dicho procedimiento es necesario para obtener la máxima resistencia de la estructura.

Figura 6.- Panel para uso como falso plafón de 61x61 cm.

4.5 Diseño de experimentos

En la manufactura de los PPL, existen diferentes componentes que contribuyen para que la estructura satisfaga las necesidades cualitativas que deben reunir los paneles. Sin embargo es necesario determinar los elementos más significativos para poder alcanzar un nivel óptimo, definiendo las cantidades mínimas y máximas a utilizar en la manufactura de los paneles. Se creó un diseño de experimentos utilizando la técnica de **Diseño de Superficie de Respuesta** con el fin de optimizar la densidad y por consecuente la resistencia de los paneles, además se realizó un Análisis Multivariable, con el fin de calcular los estadísticos de resumen, varianzas y correlaciones de las características de los paneles fabricados en el diseño de superficie de respuesta. Para llevar a cabo los diseños experimentales se utilizó el software STATGRAPHICS Centurion XVII (Statpoint, 2016).

4.5.1 Superficie de respuesta

Se ingresaron todos los elementos al diseño de superficie de respuesta, con excepción de la malla de fibra de vidrio ya que no varían sus cantidades y la fibra de polipropileno, debido a que se utilizaron las cantidades definidas por el fabricante. Se seleccionaron los límites inferiores y superiores en porcentaje y se seleccionaron las unidades de cada factor.

Las proporciones de los materiales se definieron tomando en cuenta las metodologías y previas experiencias en el trabajo, usando como punto de partida las cantidades descritas por Salamanca (2001).

Se seleccionó el *Diseño Central Compuesto* que consiste en un factorial completo con puntos al centro más puntos estrella que son utilizados para modelar la curvatura que se obtiene con respecto a cada factor.

Tabla 1. Factores y unidades de la Superficie de Respuesta

Variables independientes (covariables)	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Cemento	25	30	Porcentaje	Sí
Jales	30	45	Porcentaje	Sí
Agua	16	22	Porcentaje	Sí
Sellador Vinílico	3	5	Porcentaje	Sí
Espumante	5	6	Porcentaje	Sí

Variables dependientes	Unidades
Densidad	Kg/m3
Resistencia	Kg/m3

Para completar el diseño de superficie de respuesta, el software requirió realizar un total de 28 corridas experimentales incluyendo 2 puntos centrales por bloque con 7 grados de libertad para el error, por lo que se fabricaron 28 probetas experimentales por duplicado. Para el resultado se seleccionó como respuesta la densidad y la resistencia, en unidades de Kg/cm^3.

Figura 7.- Probetas experimentales para el diseño de Superficie de Respuesta

4.5.2 Análisis Multivariado

Para la elaboración del Análisis Multivariado se seleccionaron todos los factores del diseño de superficie de respuesta y como variables dependientes se adicionaron los resultados de la caracterización realizada en base a la **NOM-018-ENER-2011.**

Tabla 2. Variables dependientes e independientes en Análisis Multivariado.

Variables independientes (covariables)	Variables dependientes
Cemento	Absorción de agua % masa
Jales	Densidad Kg/m^3
Agua	Adsorción de humedad %masa
Sellador Vinílico	Resistencia Kg/m^2
Espumante Concentrado	Conductividad térmica W/m*K
	Permeabilidad al Vapor de Agua

4.6 Caracterización de los paneles prefabricados ligeros

Con la finalidad de determinar si los PPL aún se clasificaban como residuos peligrosos, se realizaron la mismas pruebas que se aplicaron en la caracterización de los jales, sólo que ahora se tomó la muestra seleccionando un PPL con la menor cantidad de cemento Portland contenido, con la intención de determinar si los PPL se verían limitados por la adición de una baja cantidad de dicho elemento.

Se realizó la caracterización de las propiedades físicas de los PPL tomando como referencia las características a evaluar mencionadas en la NOM-018-ENER-2011, dónde se menciona que los fabricantes de aislantes térmicos para edificaciones deben indicar la densidad aparente, conductividad térmica, permeabilidad al vapor de agua, adsorción de humedad y absorción de agua de los productos termoaislantes. Si bien la NOM-018-ENER-2011 establece los métodos de prueba para determinar las características específicas de los materiales termoaislantes, por cuestiones de derechos de autor se optó por utilizar métodos independientes a dicha norma.

4.6.1 Densidad aparente

Según Flores *et al.* (2015) la densidad aparente se define como *la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros (saturables y no saturables), y se puede definir por la siguiente expresión:*

$$\rho ap = m / V \quad (\text{Ec. } 3)$$

Dónde

ρap: densidad aparente [kg/m3]

m: masa de la muestra

V: volumen de la muestra

Los PPL tienen una forma geométrica de paralelepípedo, por lo que fue sencillo determinar las variables para poder desarrollar la ecuación.

4.6.2 Conductividad térmica

Se realizó el cálculo de la conductividad térmica de los PPL utilizando la **Ley de Fourier de la Conducción de Calor** (Cengel y Ghajar, 2007) determinada por la siguiente ecuación:

$$Q_{cond} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Ec. } 4)$$

Dónde

Q_{cond} = Razón de transferencia de calor

k = Conductividad térmica

A = Área

ΔT = Gradiente de temperatura

Δx = Espesor del material

Se diseñó un método basado en el desarrollo experimental propuesto por Tibaquira y Fonseca (2008), que consta de una figura cuasi cubica, formada por 5 paneles de un material termoaislante (en este caso poliestireno expandido) y utilizando como fuente calorífica una lámpara de luz intensa. En la cara faltante de la figura se coloca el material a medir su conductividad térmica. Para realizar las mediciones del gradiente de temperatura se utilizó un termómetro de infrarrojo.

Figura 8.- Termómetro de infrarrojo

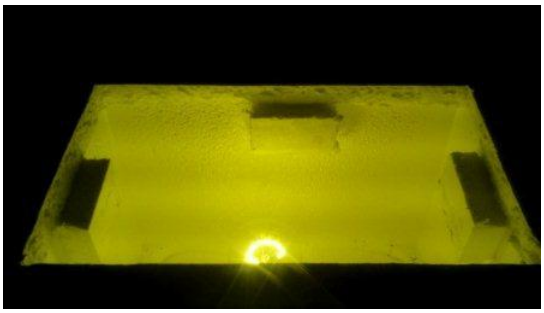


Figura 9.- Fuente calorífica

4.6.3 Permeabilidad al vapor de agua

Se realizó la prueba de Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) utilizando como referencia la norma ASTM-E96, que consiste básicamente en un plato impermeable que contiene agua destilada, dónde se coloca el panel con los bordes sellados, con la finalidad de medir en peso la cantidad de vapor de agua perdido a través del material a evaluar. Para calcular la Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$PVA = \frac{AVT}{\Delta p} = AVT/S(R1 - R2) \text{ (Ec. 5)}$$

Dónde:

AVT = Transmisión del Vapor de Agua

Δp = Diferencia de presión de vapor, en Hg

S = Presión de vapor de saturación a temperatura de ensayo en mm Hg

R_1 = Humedad relativa del plato de prueba

R_2 = Humedad relativa de la cámara

$$AVT = \frac{G}{tA} = (\frac{G}{t})/A \quad (\text{Ec. } 6)$$

Dónde

G = Cambio de peso (de la línea recta), g

T = Tiempo en horas

G/t = Pendiente de la línea recta, g/h

A = Área de prueba en m^2

4.6.4 Adsorción de humedad y absorción de agua

Para determinar la capacidad de adsorción de humedad y absorción de agua de los PPL, se utilizó como referencia la norma ASTM C209 y ASTM D1037. Los paneles se sumergieron de manera horizontal en un contenedor con agua del grifo, a una temperatura de 20 ± 1 °C y que los cubriera con un mínimo de 2.5 cm; después de 24 horas de permanecer sumergidos se dreno el agua y permanecieron en reposo por 10 minutos. Se tomaron los pesos previo y posterior a ser sumergidos en el agua y se calculó la cantidad de agua absorbida por la diferencia de peso en las muestras.

Para determinar la capacidad de adsorción de humedad, las muestras se sometieron a un ambiente con humedad relativa del 100 % por 24 horas, utilizando un reactor de aluminio para generar la humedad con temperatura y agua, y permaneciendo en una cámara sellada; se registraron los pesos antes y después del ingreso a la cámara. Para determinar el Volumen de Contenido de Humedad (VCH) se utilizó la siguiente ecuación (PIMA, 2011):

$$VCH\ (\%) = CHM\ (\%\ base\ de\ peso\ en\ volúmen) \times \frac{DM}{DA}\ (\text{Ec. } 7)$$

Dónde

VCH = volumen de contenido de humedad en (%)

CHM= Contenido de humedad absorbido por la muestra en 24 horas (%)

DM = Densidad del material (kg/m^3)

DA = Densidad del agua (kg/m^3)

4.6.5 Resistencia a la flexión

La prueba de resistencia a la flexión se realizó tomando como referencia la norma ASTM-C473. Las probetas se evaluaron soportándolas en sus extremos en dos puntos de apoyo situados de forma paralela a 5" y aplicando una carga central entre los dos soportes con una velocidad de 50 mm/min hasta el rompimiento de la probeta, y se registraron los puntos de ruptura y la carga soportada. Para evaluar la resistencia a la flexión se utilizó equipo electromecánico de prueba universal de la marca "INSTRON" que es un sistema de ensayo de doble columna de la serie 3360.

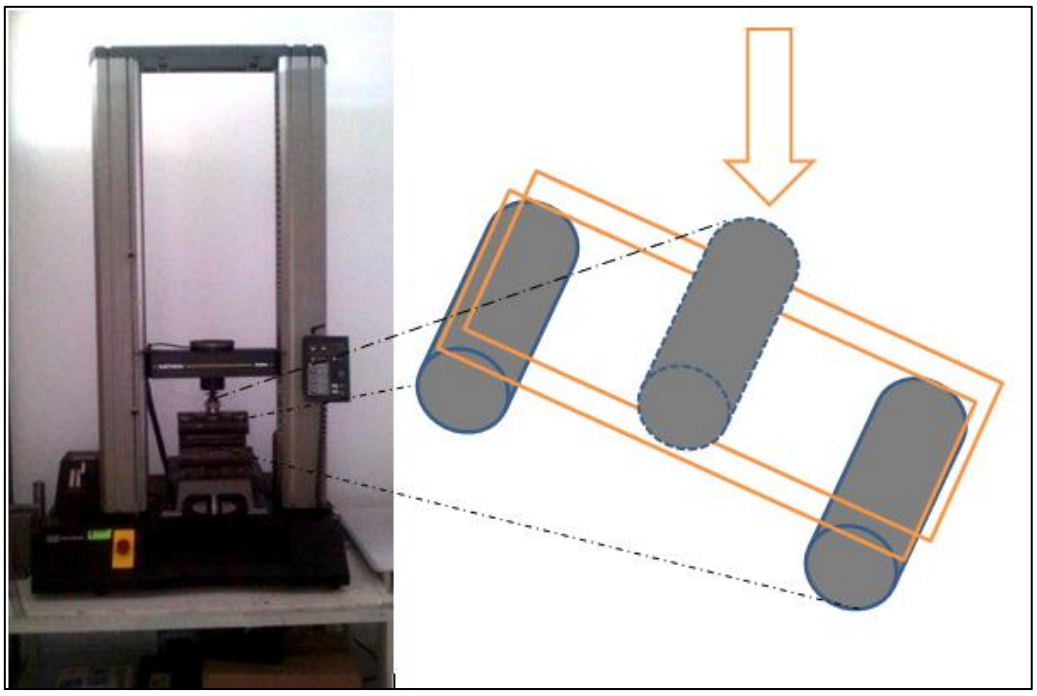


Figura 10. Sistema electromecánico de prueba universal

4.6.6 Costos de producción de los paneles prefabricados ligeros.

Con la finalidad de calcular los costos aproximados de producción de los PPL sólo se tomaron en cuenta los costos directos o variables, que pueden ser conformados por salidas monetarias y consumos que son continuos en su cantidad y valor, integrados de manera general por los costos de insumos, mano de obra y equipo de producción. El costo variable será constante por la unidad fabricada, sin embargo presentará variación con el total de producción realizada (Villegas, 2001). Para efectos del presente estudio, se darán a conocer los costos variables respecto a los insumos requeridos para la producción de los PPL.

V. RESULTADOS

5.1.1 Resultados de la "Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO2"

Tabla 3. Elementos analizados en los jales, cantidades encontradas y LMP según la NOM-052-SEMARNAT-2005.

Elemento	As	Ba	Be	Ca	Cr	Mg	Ag	Pb	Ti	Se	V
mg/L	<0.005	0.24	<0.005	<0.005	<0.005	<0.001	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
LMP NOM-052-SEMARNAT-2005	5	100	N/A	1	250	5	0.2	5	5	N/A	1

5.1.2 Resultados de la Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales

Tabla 4. Potencial de Neutralización, Potencial de Acidificación, pH y porcentaje de humedad de los jales.

%		U pH	%
(PN)	(PA)	pH	Humedad
0	2.22	3.89	14.3

5.2 Resultados de la Caracterización físico-química de los paneles prefabricados ligeros

5.2.1 Resultado de la Prueba de Balance Ácido-Base en los paneles prefabricados ligeros

Tabla 5. Potencial de Neutralización, Potencial de Acidificación, pH y porcentaje de humedad del PPL.

Kg $CaCO_3$		U pH	%
(PN)	(PA)	pH	Humedad
422.5	2.22	8	0

Vf=21 Va= 3 Vb= 2 Vc= 16 NaOH=41 Peso de la muestra= 2g

PN= 422.5

PN/PA= 190.31

5.2.2 Resultado de Densidad Aparente

Tabla 6. Resultados de Densidad Aparente de los paneles prefabricados ligeros

N°	Densidad Aparente Kg/m3	N°	Densidad Aparente Kg/m3
1	781.8	15	650.1
2	642.8	16	763.4
3	630.1	17	686.6
4	558.2	18	725.0
5	761.5	19	1214.0
6	584.4	20	656.7
7	676.2	21	593.5
8	817.0	22	818.6
9	569.9	23	680.5
10	538.1	24	616.9
11	613.4	25	853.1
12	676.3	26	584.0
13	684.9	27	616.0
14	687.6	28	668.8

5.2.3 Resultado de la prueba de Conductividad Térmica de los paneles prefabricados ligeros

Tabla 7. Resultados de Coeficiente de Conductividad Térmica

N°	W/m*K	N°	W/m*K
1	0.1451	15	0.1534
2	0.1671	16	0.1604
3	0.1472	17	0.1403
4	0.1475	18	0.1534
5	0.1560	19	0.1589
6	0.1588	20	0.1626
7	0.1465	21	0.1558
8	0.1442	22	0.1519
9	0.1450	23	0.1499
10	0.1450	24	0.1614
11	0.1620	25	0.1593
12	0.1523	26	0.1604
13	0.1477	27	0.1541
14	0.1458	28	0.1651

5.2.4 Resultado de la prueba de Permeabilidad al Vapor de Agua de los paneles prefabricados ligeros

Tabla 8. Resultados de la prueba de Permeabilidad al Vapor de Agua

N°	PVA ng/Pa.s.m2	US Perm	N°	PVA ng/Pa.s.m2	US Perm
1	1131.34	19.70	15	1342.60	23.38
2	4476.99	77.96	16	1756.77	30.59
3	1520.83	26.48	17	1527.92	26.61
4	2898.45	50.47	18	1264.19	22.01
5	1133.32	19.74	19	2218.72	38.64
6	1544.65	26.90	20	1544.79	26.90
7	1370.25	23.86	21	1589.31	27.68
8	1263.77	22.01	22	1636.53	28.50
9	2404.32	41.87	23	3992.50	69.53
10	3407.48	59.34	24	3729.76	64.95

11	1807.39	31.47	25	2500.17	43.54
12	1273.27	22.17	26	3774.00	65.72
13	2105.00	36.66	27	1315.24	22.90
14	1627.46	28.34	28	2793.25	48.64

5.2.5 Resultado de la prueba de Absorción de Agua y Adsorción de Humedad de los paneles prefabricados ligeros

Tabla 9. Resultados de la prueba de Absorción de Agua.

N°	Absorción de agua % en masa	N°	Absorción de agua % en masa
1	55.16	15	81.42
2	64.02	16	64.56
3	67.62	17	63.50
4	60.35	18	59.39
5	56.70	19	32.64
6	60.75	20	59.32
7	74.00	21	70.85
8	47.21	22	35.11
9	79.53	23	61.33
10	57.26	24	67.69
11	71.86	25	46.38
12	78.39	26	71.46
13	47.60	27	84.51
14	65.57	28	65.92

Tabla 10. Resultados de la prueba de Adsorción de humedad en porcentaje de masa y volumen.

N°	Absorción de agua % en masa	Absorción de agua % en volumen	N°	Absorción de agua % en masa	Absorción de agua % en volumen
1	7.07	5.52	15	31.53	20.50
2	9.46	6.08	16	29.99	22.90
3	6.46	4.07	17	6.01	4.13
4	35.38	19.75	18	5.44	3.95
5	6.55	4.99	19	20.79	25.24
6	33.86	19.79	20	8.19	5.38
7	18.27	12.35	21	7.40	4.39
8	24.80	20.26	22	7.55	6.18
9	21.36	12.17	23	4.51	3.07
10	24.13	12.98	24	8.11	5.00
11	14.16	8.68	25	2.12	1.81
12	10.39	7.03	26	5.37	3.14
13	28.85	19.76	27	33.62	20.71
14	21.31	14.66	28	6.30	4.21

5.2.6 Resultado de resistencia a la flexión de los paneles prefabricados ligeros

Tabla 11. Resultado de resistencia a la flexión

N°	Carga en kg/cm² a 50 mm/min	N°	Carga en kg/cm² a 50 mm/min
1	62.6	15	63.8
2	62.1	16	62.4
3	62.6	17	61.13
4	62.6	18	63.8
5	63.9	19	62.4
6	61.7	20	62.6
7	62.9	21	62.55
8	62.55	22	62.6
9	61.8	23	63.9
10	62.5	24	63.1
11	62.4	25	62.6
12	62.51	26	63.35

13	63	27	62.8
14	63.8	28	64

5.2.7 Resultado de costos aproximados de producción de los paneles prefabricados ligeros

Tabla 12. Costo unitario de insumos

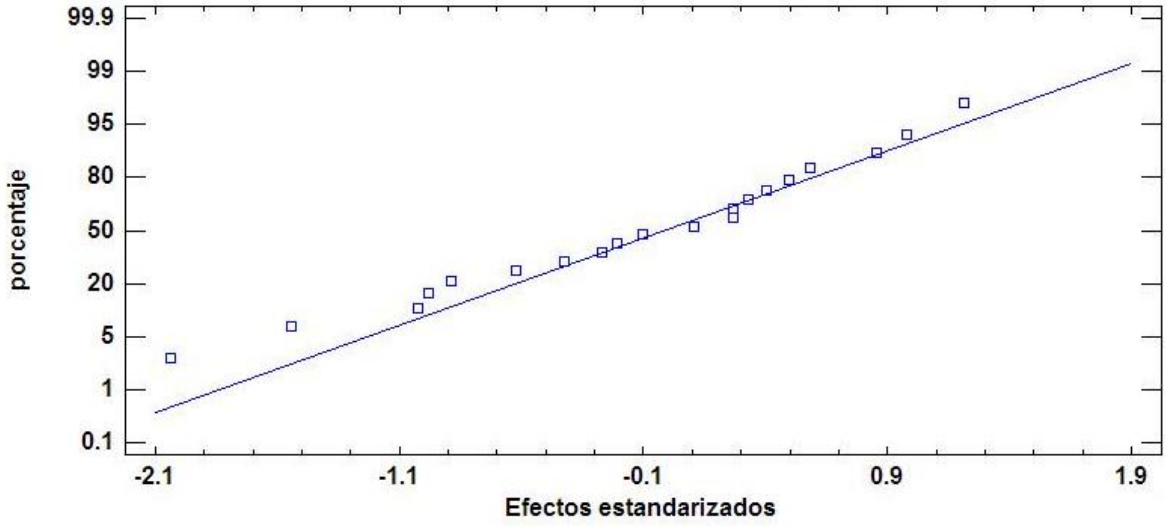
COSTO DE INSUMOS			
Material	**Cantidad**	**Unidad**	**Precio**
Agua	1	m^3	$ 5.94
Cemento	1	Bulto 50 kg	$ 148.00
Espumante	1	Porrón 20 L	$ 2,000.00
Fibra	1	Bulto 600 gr	$ 97.00
Malla	1	Rollo 1x50 m	$ 705.00
Sellador vinílico	1	Cubeta 19 L	$ 435.00
Jal	N/A	N/A	$ -

Tabla 13. Costos aproximados de producción

COSTO APROXIMADO DE PRODUCCIÓN	
Concepto	Cantidad
Costo por hoja de 1.22 x 2.44	$ 111.44
Costo por m2	$ 37.43
Costo por m3	$ 2,947.60

5.2.8 Resultados de Superficie de Respuesta

Figura 11. Gráfica de Probabilidad Normal para resistencia



R-cuadrada = 68.651 porciento

La ecuación del modelo ajustado con la que se realizó la predicción de la optimización de la respuesta es:

(Ec. 8)

$$Resistencia = 6.60882 + 1.07942 * \text{Cemento} - 0.320139 * \text{Jales} - 0.262569 * \text{Agua} + 2.86792 * \text{Sellador Vinílico} - 4.76125 * \text{Espumante} - 0.02675 * \text{Cemento}^2 + 0.0052 * \text{Cemento} * \text{Jales} - 0.0111667 * \text{Cemento} * \text{Agua} - 0.049 * \text{Cemento} * \text{Sellador Vinílico} + 0.092 * \text{Cemento} * \text{Espumante} - 0.000305556 * \text{Jales}^2 + 0.0035 * \text{Jales} * \text{Agua} + 0.00866667 * \text{Jales} * \text{Sellador Vinílico} + 0.014 * \text{Jales} * \text{Espumante} + 0.0161458 * \text{Agua}^2 + 0.00708333 * \text{Agua} * \text{Sellador Vinílico} - 0.0275 * \text{Agua} * \text{Espumante} - 0.150937 * \text{Sellador Vinílico}^2 - 0.105 * \text{Sellador Vinílico} * \text{Espumante} + 0.18125 * \text{Espumante}^2$$

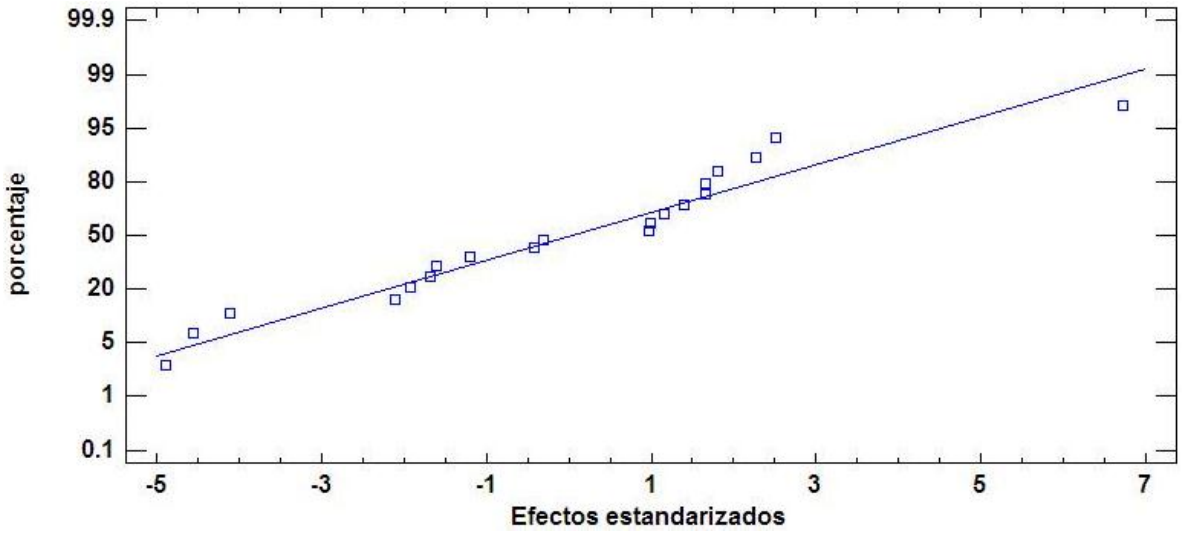
Meta: maximizar Resistencia

Valor óptimo = 6.08509

Tabla 14. Valores óptimos para maximizar resistencia

Factor	*Bajo*	*Alto*	*Óptimo*
Cemento	22.5	32.5	23.0555
Jales	22.5	52.5	29.5581
Agua	13.0	25.0	24.9998
Sellador Vinílico	2.0	6.0	6.0
Espumante	4.5	6.5	4.5

Figura 12. Gráfica de Probabilidad Normal para Densidad



R-cuadrada = 97.4641 porciento

La ecuación del modelo ajustado con la que se realizó la predicción de la optimización de la respuesta es:

(Ec. 9)

$$Densidad = 0.00478196 - 0.000371751 * \text{Cemento} + 0.0000277224 * \text{Jales} + 0.0000438811 * \text{Agua} + 0.000121297 * \text{Sellador Vinílico} + 0.0000156067 * \text{Espumante} + 0.00000369064 * \text{Cemento}^2 - 0.0000016289 * \text{Cemento} * \text{Jales} + 0.00000414557 * \text{Cemento} * \text{Agua} - 0.00000318103 * \text{Cemento} * \text{Sellador Vinílico} + 0.000032145 * \text{Cemento} * \text{Espumante} - 4.8254E-7 * \text{Jales}^2 + 0.0000036706 * \text{Jales} * \text{Agua} - 0.00000646272 * \text{Jales} * \text{Sellador Vinílico} - 0.00000174568 * \text{Jales} * \text{Espumante} - 0.00000545315 * \text{Agua}^2 + 0.0000051494 * \text{Agua} * \text{Sellador Vinílico} - 0.0000147618 * \text{Agua} * \text{Espumante} - 0.0000238349 * \text{Sellador Vinílico}^2 + 0.0000545189 * \text{Sellador Vinílico} * \text{Espumante} - 0.0000507489 * \text{Espumante}^2$$

Meta: minimizar Densidad

Valor óptimo = 0.00242649

Tabla 15. Valores óptimos para maximizar densidad

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Cemento	22.5	32.5	31.7549
Jales	22.5	52.5	22.5
Agua	13.0	25.0	18.1665
Sellador Vinílico	2.0	6.0	5.13517
Espumante	4.5	6.5	6.5

Figura 13. Malla de la superficie de respuesta estimada para la resistencia

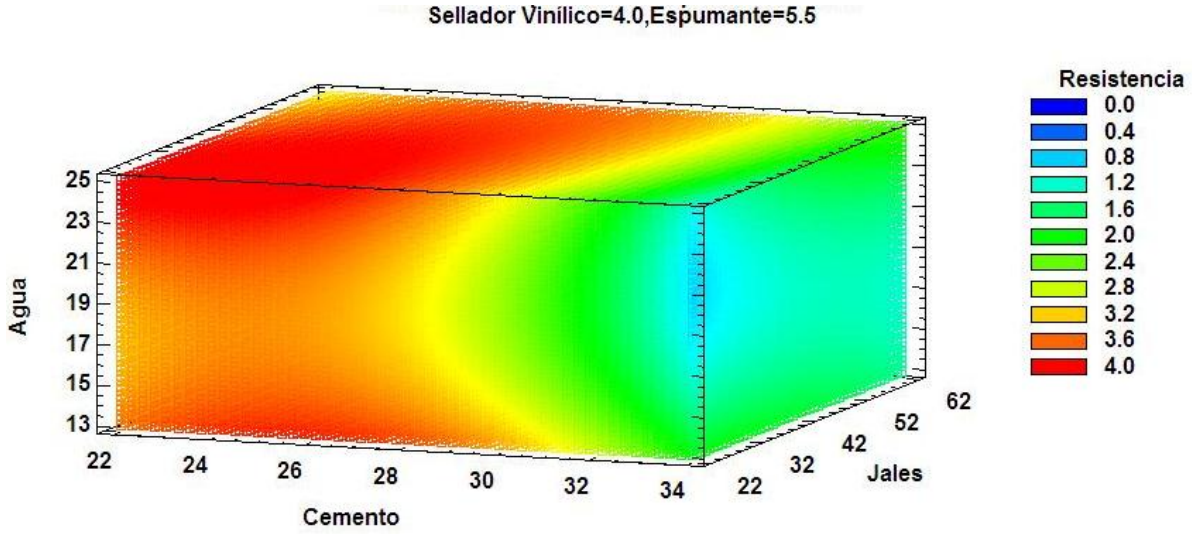


Figura 14. Malla de la superficie de respuesta estimada para la densidad

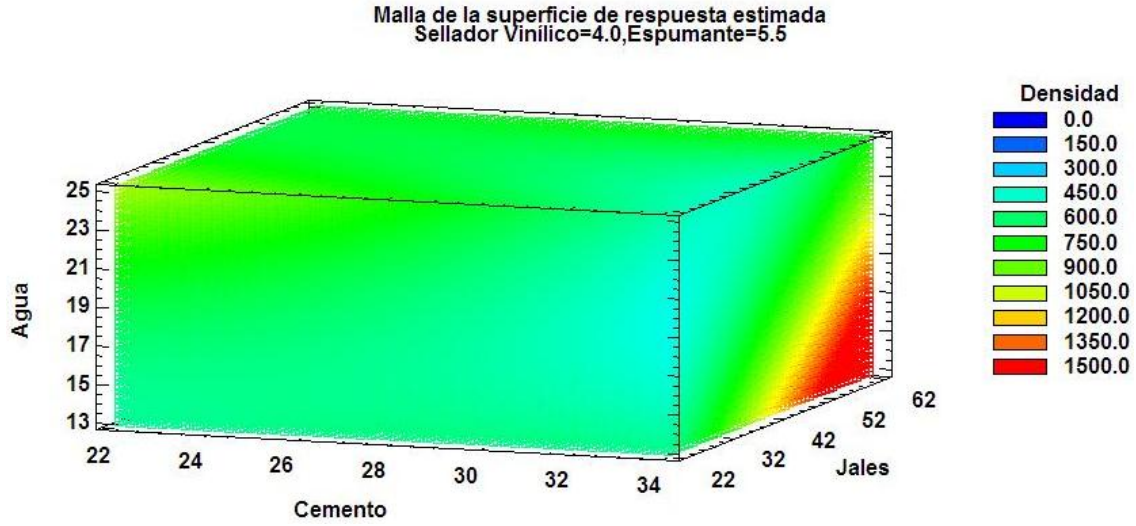


Figura 15. Superficie de respuesta estimada para resistencia

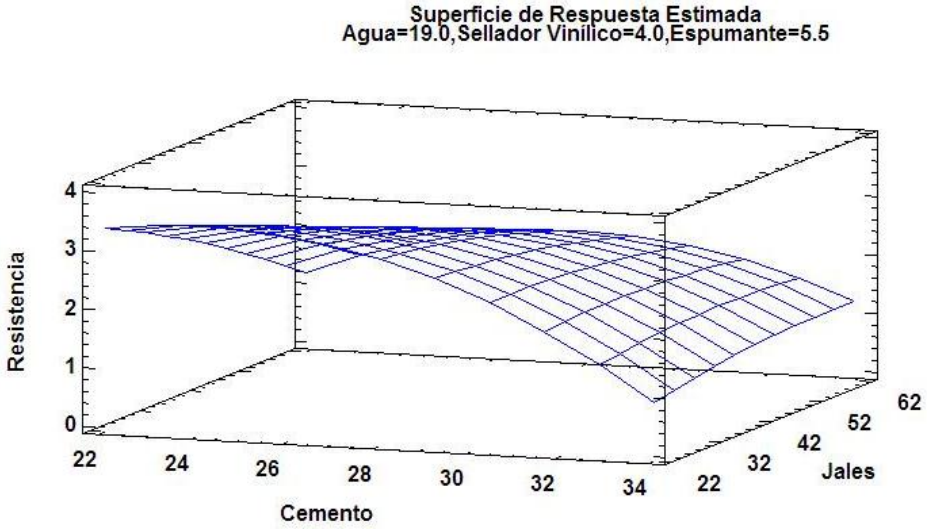
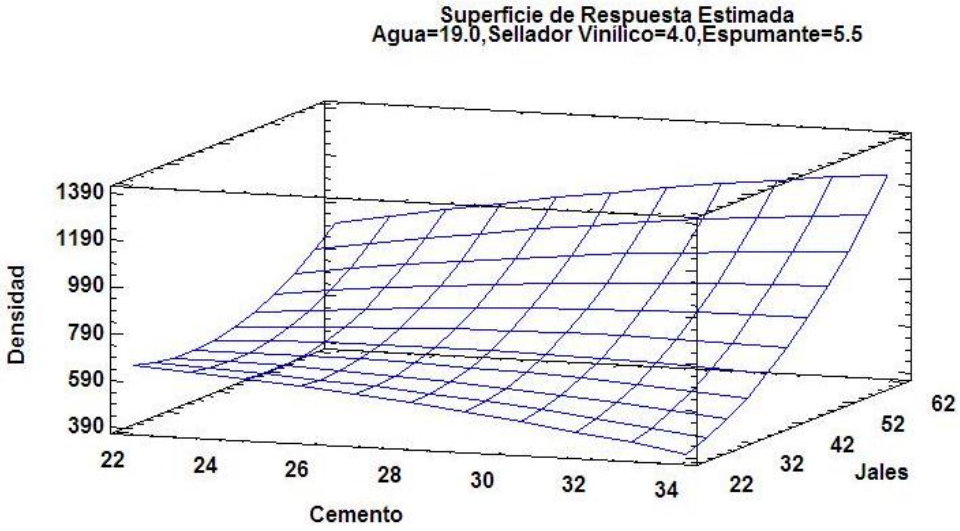


Figura 16. Superficie de respuesta estimada para densidad



5.2.9 Resultado de Análisis Multivariado

Tabla 16. Resumen estadístico 1er corrida

	% Cemento	*% Jales*	*% Agua*	*% Espumante*	*% Sellador vinílico*
Recuento	28	28	28	28	28
Promedio	27.5	37.5	19.0	5.5	20.0
Desviación Estándar	2.35702	7.07107	2.82843	0.471405	4.71405
Coeficiente de Variación	8.57099%	18.8562 %	14.8865 %	8.57099%	23.5702%
Mínimo	22.5	22.5	13.0	4.5	10.0
Máximo	32.5	52.5	25.0	6.5	30.0
Rango	10.0	30.0	12.0	2.0	20.0
Sesgo Estandarizado	0	0	0	0	0
Curtosis Estandarizada	-0.598222	-0.598222	-0.598222	-0.598222	-0.598222

	Densidad kg/m3	*Conductividad Térmica W/m*K*
Recuento	28	28
Promedio	0.691054	0.153467
Desviación Estándar	0.131484	0.00731934
Coeficiente de Variación	19.0265%	4.76934%
Mínimo	0.53808	0.140331
Máximo	1.21403	0.167105
Rango	0.675952	0.0267738
Sesgo Estandarizado	5.30862	0.184248
Curtosis Estandarizada	9.35504	-1.20883

	Absorción de agua en % masa	*Adsorción de humedad % masa*	*PVA*
Recuento	28	28	28
Promedio	62.5041	15.6786	3.57536E-8
Desviación Estándar	12.6761	10.8556	1.65494E-8
Coeficiente de	20.2804%	69.2382%	46.2874%

Variación			
Mínimo	32.6418	2.11996	1.92125E-8
Máximo	84.5143	35.3841	7.60289E-8
Rango	51.8726	33.2641	5.68164E-8
Sesgo Estandarizado	-1.21474	1.22569	2.42123
Curtosis Estandarizada	0.39926	-1.33461	0.104612

	Resistencia a la flexión
Recuento	28
Promedio	2.78536
Desviación Estándar	0.715037
Coeficiente de Variación	25.6713%
Mínimo	1.13
Máximo	4.0
Rango	2.87
Sesgo Estandarizado	0.128397
Curtosis Estandarizada	-0.0574821

Tabla 17. Resumen estadístico 2da corrida

	% Cemento	*% Jales*	*% Agua*	*% Espumante*	*% Sellador vinílico*
Recuento	28	28	28	28	28
Promedio	27.5	37.5	19.0	5.5	20.0
Desviación Estándar	2.35702	7.07107	2.82843	0.471405	4.71405
Coeficiente de Variación	8.57099%	18.8562%	14.8865%	8.57099%	23.5702%
Mínimo	22.5	22.5	13.0	4.5	10.0
Máximo	32.5	52.5	25.0	6.5	30.0
Rango	10.0	30.0	12.0	2.0	20.0
Sesgo Estandarizado	0	0	0	0	0
Curtosis Estandarizada	-0.598222	-0.598222	-0.598222	-0.598222	-0.598222

	*Conductividad Térmica W/m*K*	*Absorción de agua en % masa*
Recuento	28	28
Promedio	0.153467	62.5041
Desviación Estándar	0.00731934	12.6761
Coeficiente de Variación	4.76934%	20.2804%
Mínimo	0.140331	32.6418
Máximo	0.167105	84.5143
Rango	0.0267738	51.8726
Sesgo Estandarizado	0.184248	-1.21474
Curtosis Estandarizada	-1.20883	0.39926

	Adsorción de humedad % masa	*Resistencia a la flexión*	*PVA Log*
Recuento	28	28	28
Promedio	15.6786	2.78536	-7.48565
Desviación Estándar	10.8556	0.715037	0.181219
Coeficiente de Variación	69.2382%	25.6713%	-2.42089 %
Mínimo	2.11996	1.13	-7.71642
Máximo	35.3841	4.0	-7.11902
Rango	33.2641	2.87	0.597395
Sesgo Estandarizado	1.22569	0.128397	**1.4249**
Curtosis Estandarizada	-1.33461	-0.0574821	-0.890168

	Densidad kg/m3 1/Y
Recuento	28
Promedio	1.48598
Desviación Estándar	0.220828
Coeficiente de Variación	14.8608%
Mínimo	0.823701
Máximo	1.85846
Rango	1.03476
Sesgo Estandarizado	**-1.90841**
Curtosis Estandarizada	**1.76036**

Tabla 18. Correlaciones variables independientes y variables dependientes

	% Cemento	% Jales	% Agua	% Espumante	% Sellador vinílico
Conductividad Térmica W/m*K	-0.4319	0.0342	-0.0334	0.0842	0.1184
P-valor	0.0217	0.8627	0.8661	0.6701	0.5485
Absorción de agua en % masa	0.1908	-0.3588	0.4657	0.0606	0.042
P-valor	0.3307	0.0608	0.0125	0.7592	0.832
Adsorción de humedad % masa	0.6279	-0.0464	0.0641	0.2731	0.0518
P-valor	0.0003	0.8145	0.746	0.1597	0.7936
Resistencia a la flexión	-0.3263	-0.2165	0.2066	-0.4318	0.2571
P-valor	0.0901	0.2686	0.2916	0.0218	0.1866
PVA Log	-0.2707	-0.4284	-0.0755	0.1899	-0.0859
P-valor	0.1635	0.0229	0.7024	0.333	0.6639
Densidad kg/m3 1/Y	0.1387	-0.6075	0.355	0.4558	-0.0065
P-valor	0.4816	0.0006	0.0637	0.0148	0.9738

Tabla 19. Correlaciones variables dependientes

	Conductividad Térmica W/m*K	Absorción de agua en % masa	Adsorción de humedad % masa	Resistencia a la flexión	PVA Log	Densidad kg/m3 1/Y
	0.5485	0.832	0.7936	0.1866	0.6639	0.9738
Conductividad Térmica W/m*K		0.0239	-0.2051	0.157	0.3239	-0.0586
P-valor		0.904	0.2951	0.4249	0.0927	0.7672
Absorción de agua en % masa	0.0239		0.1318	0.0752	-0.0593	0.6685
P-valor	0.904		0.5038	0.7036	0.7644	0.0001
Adsorción de humedad % masa	-0.2051	0.1318		-0.1693	-0.1216	0.2111
P-valor	0.2951	0.5038		0.3892	0.5375	0.281
Resistencia a la flexión	0.157	0.0752	-0.1693		0.0357	-0.0909
P-valor	0.4249	0.7036	0.3892		0.857	0.6453
PVA Log	0.3239	-0.0593	-0.1216	0.0357		0.2993
P-valor	0.0927	0.7644	0.5375	0.857		0.1218

Densidad kg/m3 1/Y	-0.0586	0.6685	0.2111	-0.0909	0.2993	
	0.7672	0.0001	0.281	0.6453	0.1218	

Figura 17. Gráfico de % espumante vs resistencia a flexión

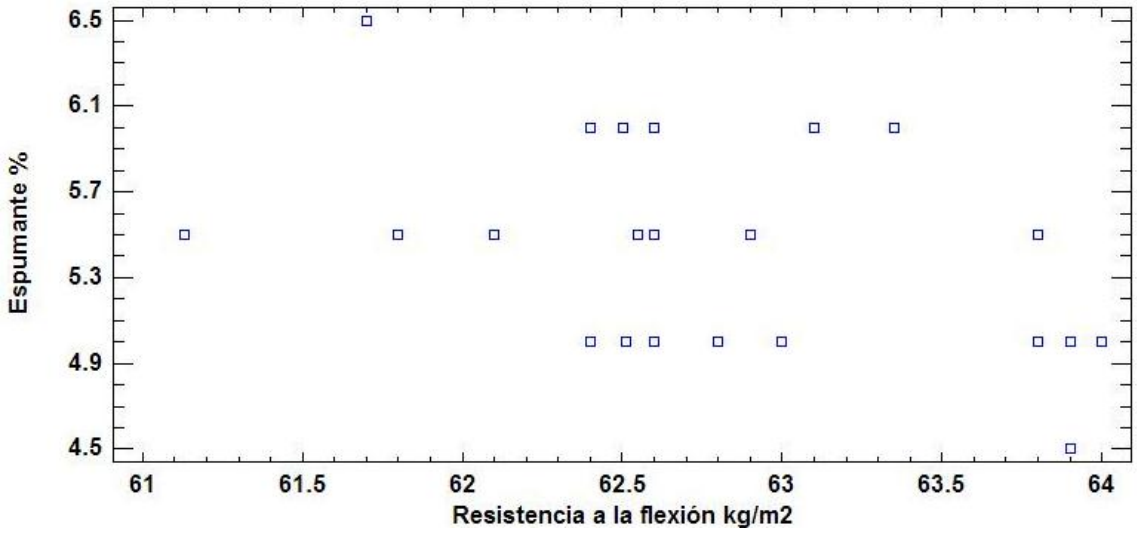


Figura 18. Gráfico de % de agua vs absorción de agua en % masa

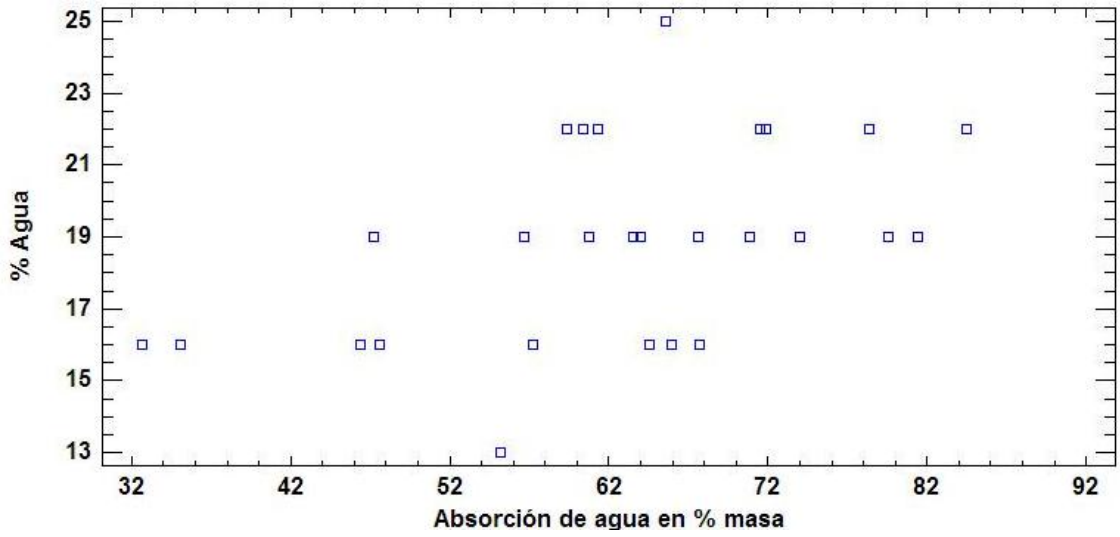


Figura 19. Gráfico de % cemento vs adsorción de humedad en % masa

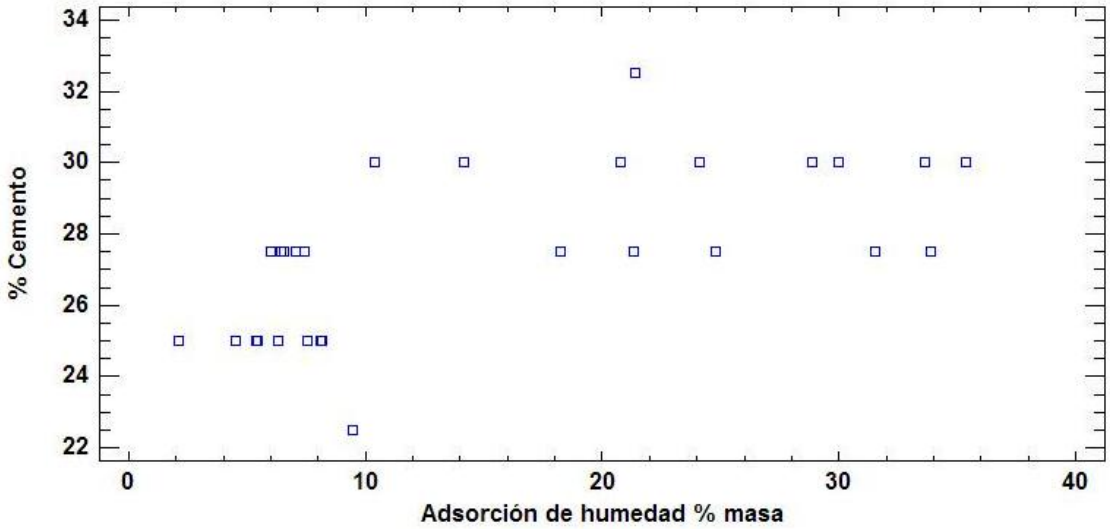


Figura 20. Gráfico de % cemento vs conductividad térmica W/m*K

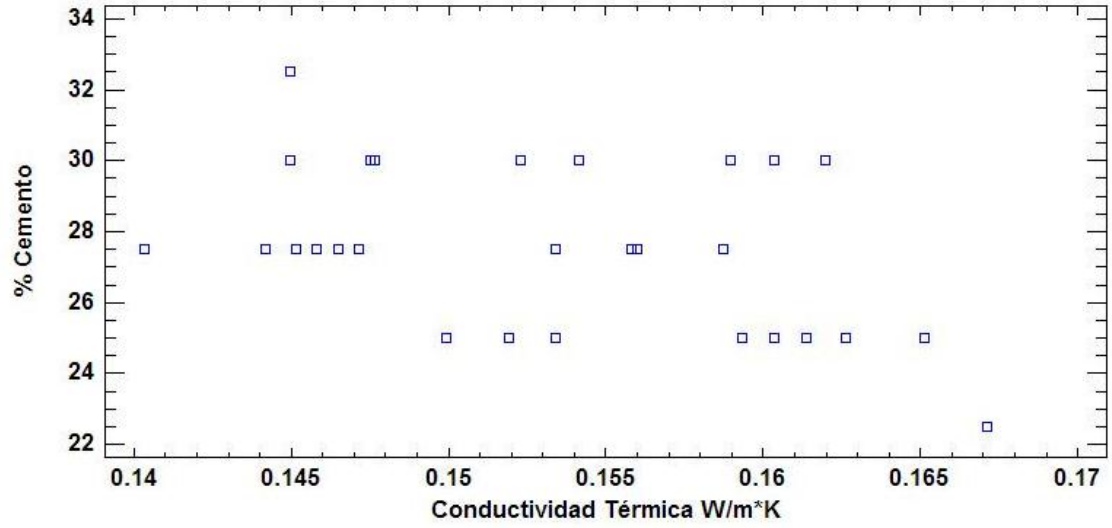


Figura 21. Gráfico de densidad vs absorción de agua en % masa

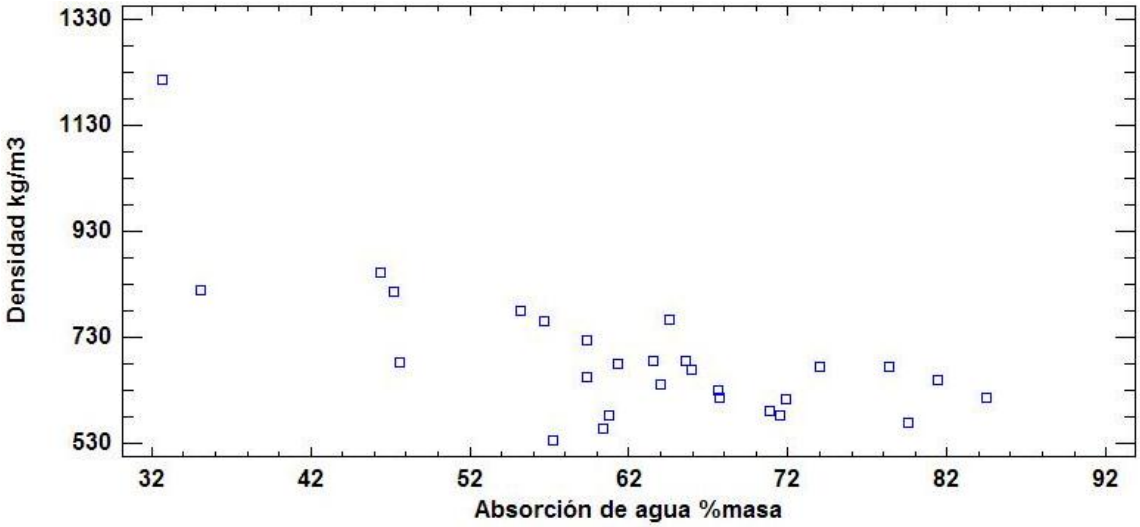


Figura 22. Gráfico de % espumante vs densidad kg/m^3

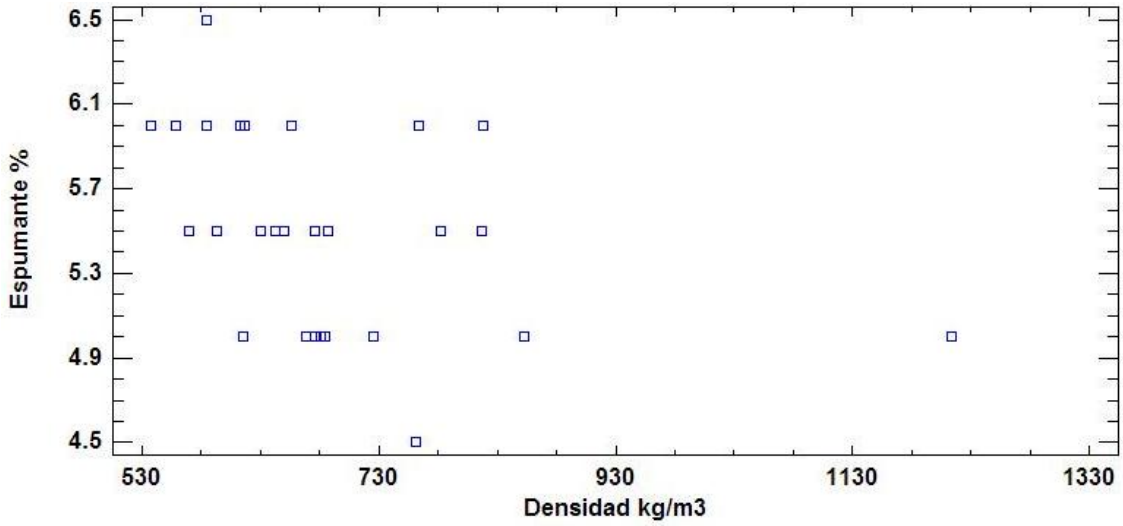


Figura 23. Gráfico de % Jales vs Densidad kg/m3

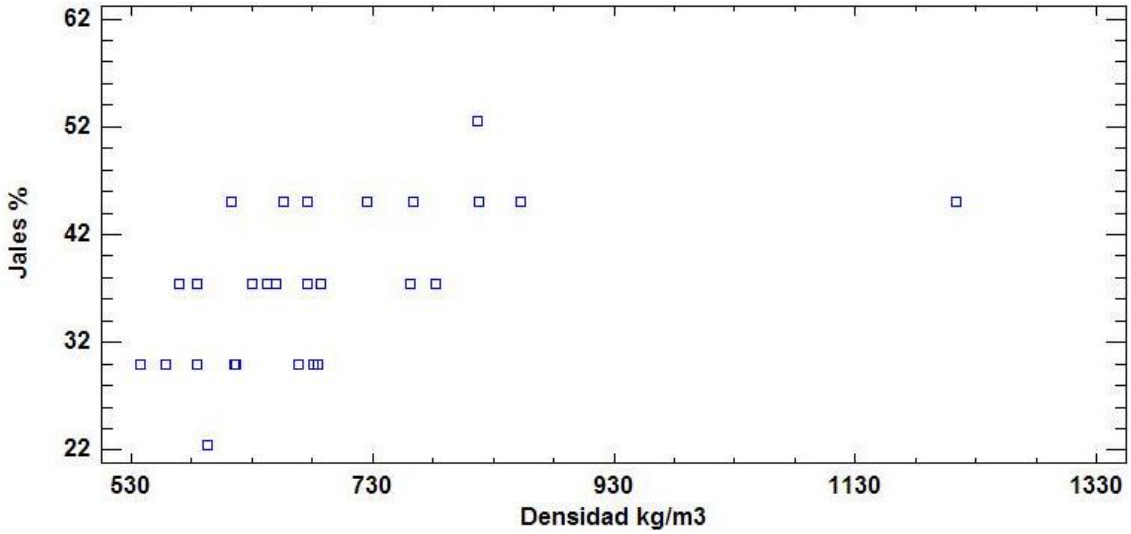
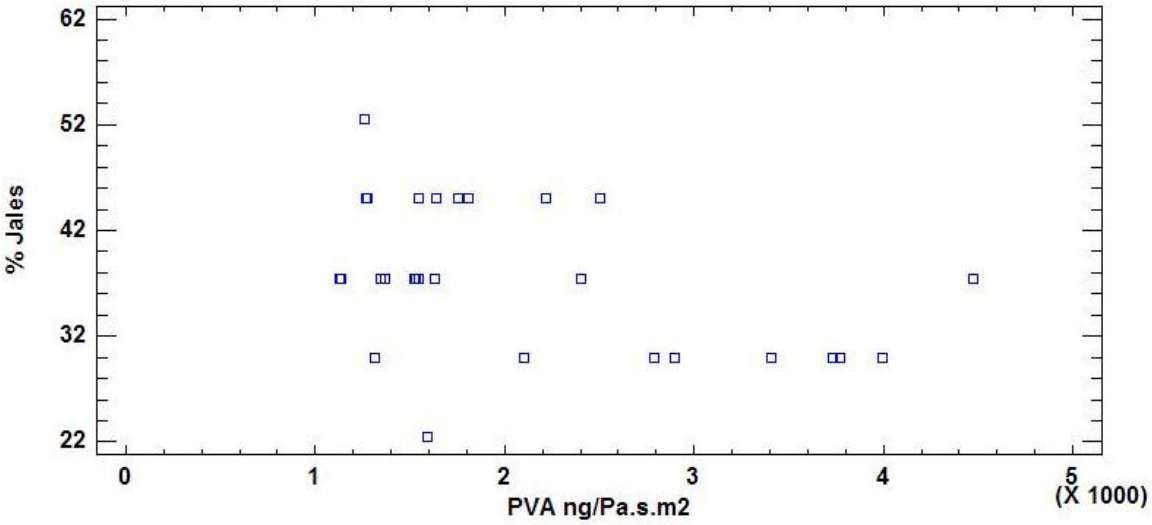


Figura 24. Gráfico de % jales vs PVA ng/Pa.s.m^2



VI. DISCUSIÓN

El primer paso previo a comenzar a elaborar los PPL, fue conocer las cantidades de metales pesados contenidos en los jales recolectados de la mina de plata La Guitarra. Como se puede observar en la Tabla 3, todos los metales pesados analizados se encuentran por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) conforme a la Norma Oficial Mexicana 052-SEMARNAT-2005, por lo tanto no presenta una categoría de residuo peligroso por metales pesados.

De acuerdo a los resultados de la Prueba de Balance Ácido-Base y según la NOM-141- SEMARNAT-2003, los jales utilizados en el presente trabajo, se clasifican como residuos peligrosos, debido a su contenido de sulfuros metálicos, ya que son potenciales productores de drenaje ácido. Dicha condición no sólo se debe a que los jales contienen sulfuros metálicos, sino que según la NOM-141- SEMARNAT-2003 y acorde con el resultado del Potencial de Neutralización, los elementos neutralizadores de ácido que naturalmente se encuentran en el medio ambiente, como algunos carbonatos, aluminosilicatos e hidróxidos, son nulos o superados por el Potencial de Acidificación.

Para determinar si los PPL aún presentaban las características de Residuos Peligrosos por su capacidad de producción de Drenaje Ácido, se realizó la Prueba de Balance Ácido-Base al panel que contenía la menor cantidad de cemento Portland, con la finalidad de determinar si las cantidades utilizadas definían un límite en la relación del Potencial de Neutralización y el Potencial de Acidificación. La prueba dio como resultado un PN/PA > 1.2, lo que significa que de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003 los PPL o sus compuestos, no se pueden considerar como residuos tóxicos.

Según Siebe *et al.* (2004) la neutralización del potencial de acidez se lleva a cabo por carbonatos o algunos aluminosilicatos, siendo uno de los neutralizadores más importantes la calcita ($CaCO_3$). La reacción de los jales que contienen pirita (FeS_2) se debe a procesos de oxidación según la ecuación 10:

FeS_2 (s) + 15/4 O_2 (g) + 7/2 H_2O → $Fe(OH)_3$ (s) + 2 $SO4^{2-}$ (aq)+ **4 H^+(**aq) (Ec. 10)

De principal interés son los **4 H^+** producidos por la reacción, ya que al encontrarse en disolución con el agua, producen una gran cantidad de drenaje ácido, debido a que el proceso de oxidación aumenta considerablemente por factores bióticos y abióticos. Sin embargo cuando están presentes compuestos como la calcita (Plumlee, Logsdon, & Filipek, 1999), la producción del **H^+** no se lleva a cabo, obteniendo la reacción que muestra la siguiente ecuación (Ec. 11):

$4FeS_{2\ (s)}$ + $8CaCO_{3\ (s)}$ + $15O_{2\ (g)}$ + $6H_2O$ → **4**$Fe(O$**H**$)_3$(s) + $8SO4^{2-}$(aq) + **8Ca^{2+}**(aq) + $8CO_{2\ (g)}$ (Ec. 11)

En la ecuación se puede observar que no se forman **H^+** sino que se forman **Ca^{2+}** y las moléculas que se forman con el H y sus átomos no forman iones.

Los aluminosilicatos según Plumlee, Logsdon, & Filipek, (1999) neutralizan los H^+ de acuerdo con la ecuación 12:

$CaAl_2Si2O_8$ (s) + **2 H^+** (aq) + H2O →**Ca^{2+}** + $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (s) (Ec. 12)

Si bien, hacer una caracterización química de la reacción química del cemento Portland con los sulfuros que contienen los jales, representa una tarea difícil debido al tamaño de las partículas, las formas complejas y la presencia de multifases (Giraldo y Tobón, 2006), al utilizar como referencia la NOM-141- SEMARNAT-2003 se puede realizar una caracterización cualitativa del Potencial de Neutralización (PN) de los jales, del cual se obtuvo un valor de 422.5, que se puede interpretar como la cantidad contenida de kg $CaCO_3$/t de jales.

El cemento Portland contiene generalmente SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O y TiO_2 (Torres *et al.,* 2012), pero no $CaCO_3$, sin embargo produce una reacción para la neutralización del Potencial de Acidez (PA) de los jales. Aunque el valor de 422.5 pudiera parecer alto, según los cálculos estequiométricos tomando como referencia la ecuación de neutralización por $CaCO_3$, tenemos que $4FeS_{2\ (s)}$ es igual a 119 g/mol x 4 mol = 476 g que serán neutralizados con $8CaCO_3$ que equivale a 100.048 g/mol x

8 mol = 800.38 g. Si tomamos como referencia 1 ton de jales que contienen 10 kg de pirita (FeS_2), podemos decir que se necesitan 16.81 kg de $CaCO_3$ para neutralizar la acidez en esa ton. La cantidad de jales utilizados en las probetas fue en promedio de 187 g, que según los cálculos ya realizados necesitarían 0.899 g de CaCO3 para neutralizar el Potencial de Acidificación en jales con 10 kg de FeS_2 por ton (1% de pirita por ton de jal). Si bien no conocemos las relaciones entre los elementos neutralizantes del cemento y los procesos de oxidación de la pirita contenida en los jales, la probeta con una menor cantidad de cemento (112.5 g) fue suficiente para obtener un valor alto de PN, dónde la relación según la NOM-141- SEMARNAT-2003, cuando PN/PA > 1.2, los jales no son potenciales generadores de Drenaje Acido (DA), concluyendo que las probetas no generarán DA, ya que presentan un valor PN/PA= 190.31 > 1.2.

La baja densidad de los PPL puede representar una opción factible como materiales termoaislantes para la construcción, ya que es una característica importante que define sus cualidades y ventajas en su implementación. Las bajas densidades en este tipo de materiales significan fácil uso y manejo de los diferentes tipos de paneles que se ofrecen en el mercado, aunado a la facilidad de colocación, lo que también se puede interpretar como bajos costos en la construcción (Alcocer *et al.,* 2013). Aunque se pueden tener grandes ventajas de las bajas densidades de los PPL, como lo menciona Panesar (2013), aún causa incertidumbre las propiedades de durabilidad y resistencia de los materiales mezclados con espumantes concentrados, hasta ahora existen pocos estudios que detallen una caracterización en su microestructura.

Las densidades obtenidas fueron de 538 a 1214 kg/m^3 (tabla 6), los datos obtenidos presentaron un sesgo estandarizado de 5.3 y una curtosis estandarizada de 9.35, que se puede interpretar como una desviación significativa de la normalidad (tabla 16 y figura 12); esta condición invalidaría algunos procedimientos estadísticos; por ello en base a la sugerencia del software utilizado para realizar el análisis multivariado, se procedió a normalizar las variables utilizando 1/Y. Se volvió a correr el análisis y se obtuvieron valores más cercanos a la normalidad (tabla 17). Los resultados obtenidos de densidad se correlacionaron con el contenido de espumante (0.4558) y

de jales (-0.6075) utilizado en las probetas, las correlaciones presentaron signos inversos debido a la normalización de los datos con 1/Y. En la **figura 22** se observa como los datos se empiezan a distribuir hacia la izquierda conforme se presenta el aumento del porcentaje de espumante, en cambio en la **figura 23** se puede observar los casos contrarios.

El resultado de optimización de la Superficie de Respuesta para la variable densidad, obtuvo un valor de R-cuadrada de 97.46%, lo que indica el grado de explicación del modelo así ajustado. El modelo estadístico sugirió una mayor cantidad de cemento y espumante concentrado (tabla 15, figura 14 y 16), que contrasta los resultados obtenidos para maximizar la resistencia; el modelo estadístico así ajustado para la resistencia obtuvo un valor de R-cuadrada de 68.65 % y se puede observar que las resistencias más grandes se logran con una menor cantidad de cemento y espumante concentrado, además de un aumento considerable en la cantidad de agua y sellador vinílico (**tabla 14, figura 13 y 15**).

El modelo busca maximizar la densidad, no disminuirla, en base a los resultados del diseño de superficie de respuesta, la disminución de la densidad en los PPL no compromete en su totalidad la resistencia. Uno de los principales objetivos en la elaboración de los paneles, fue obtener bajas densidades y altas resistencias; El uso de la malla de fibra de vidrio representó un elemento imprescindible para la elaboración de los PPL, la malla proporciono aproximadamente el 95% de la resistencia en las probetas, logrando obtener resultados de resistencia a la flexión de 61 a 64 kg/cm^2.

Las propiedades térmicas en los materiales para la construcción se relacionan directamente con el ahorro de energía (Roux y García, 2014) y el confort de las personas, aquellos materiales con un bajo coeficiente de conductividad térmica permitirán mantener las edificaciones aisladas de los cambios de temperatura, evitarán enfriamientos excesivos en invierno y evitara temperaturas altas en verano (Espinosa y Cortés, 2015). Los coeficientes de conductividad térmica obtenidos fueron de 0.14 a 0.16 W/m*K (tabla 7). La variable independiente que se correlacionó

más fuertemente con la conductividad térmica fue el cemento, que arrojó un valor de correlación de -0.4319 (tabla 18); el valor fue negativo debido a que con el aumento de la cantidad de cemento se puede observar una disminución del coeficiente de conductividad térmica. En la **figura 20** se pueden observar diferentes experimentos con la misma cantidad de cemento, las probetas presentan un aumento en el coeficiente de conductividad térmica por la influencia de las demás variables independientes, sin embargo con el aumento de la cantidad de cemento los datos se inclinan ligeramente hacia la izquierda.

En construcciones o instalaciones donde las temperaturas interiores son más bajas que las exteriores (por ejemplo en lugares con sistemas de refrigeración o aire acondicionado), se presenta el riesgo de condensación o bien el vapor de agua se puede concentrar e ingresar a las construcciones o instalaciones, causando problemas de humedad (Valencia Gabriel, 2006). Por ello es importante la evaluación del grado de Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) de materiales que se pueden utilizar como termoaislantes; los PPL presentaron valores de 1131.34 a 4476.99 ng/Pa.s.m2 (tabla 8). La PVA presentó una fuerte correlación negativa (-0.4284) con la cantidad de jales utilizados en las probetas (tabla 18), lo que significa que el aumento de la cantidad de jales en las probetas, presenta una disminución en la cantidad de perdida de vapor de agua. En la **figura 24** se observa la tendencia de los datos hacia la izquierda conforme aumenta el porcentaje de jales contenidos en las probetas, es importante tomar en cuenta los solapamientos de algunos valores obtenidos.

La importancia en el grado de absorción de agua y adsorción de humedad radican en que el contacto del agua en forma líquida o como vapor de agua, que puede generar efectos adversos en los PPL como cambios en la densidad del material y alteración del coeficiente de conductividad térmica, problemas de corrosión en estructuras, además de otras implicaciones ya mencionadas por los autores como Valencia Gabriel (2006), Roux y García (2014), Espinoza y Cortes (2015), entre otros. Por ello es importante analizar dichas características antes de proporcionar un uso directo a los PPL, los cuales presentaron porcentajes de absorción de agua de 32.6% a 84.5%

y adsorción de humedad de 20.7 a 33.61 %. El porcentaje de absorción de agua obtuvo una correlación positiva (0.4657) con el porcentaje de agua utilizado en la mezcla para la fabricación de las probetas. El porcentaje de absorción de agua se debe a los poros saturables y a su tamaño; a pesar que el espumante concentrado es el responsable de crear las burbujas y por consiguiente los poros en las probetas, si la mezcla no contiene una generosa cantidad de agua, el espumante no reaccionará eficientemente, debido a que si la mezcla tiene una consistencia más espesa, se provocará el rompimiento de la tensión en las burbujas que creo el espumante. En la **figura 18** el porcentaje de absorción de agua aumenta gradualmente y los datos presentan una tendencia hacia la derecha con el aumento en el porcentaje de agua.

Los costos de producción por m^2 sólo reflejan los gastos directos para la producción de los PPL, sin embargo no se tomaron en cuenta gastos para el establecimiento de una empresa de manufactura. A pesar de ello el costo de producción de los PPL representa un 24 a 27% aproximadamente del costo de un panel comercial.

VII. CONCLUSIONES

Los jales provenientes de la Mina de Plata La Guitarra, presentan características favorables para ser aprovechados como materia prima en la manufactura de paneles prefabricados ligeros, debido a su contenido de metales pesados que se encuentra por debajo de los LMP conforme a la normatividad nacional.

Los objetivos del presente trabajo fueron alcanzados tomando en cuenta la normatividad nacional oficial, además de las normas internacionales que hacen posible el mejoramiento y evaluación de una gran variedad de materiales, desde el punto de vista técnico. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, en México actualmente existen limitantes legislativas que carecen de un enfoque que fomente un tratamiento más eficiente de los residuos mineros.

El presente trabajo integra el estudio de la actividad estabilizante del cemento Portland para jales mineros con potencial de acidificación, que complementa los estudios que sustentan la encapsulación de metales pesados por los compuestos del cemento Portland.

Las problemáticas significativas actuales, tienen perspectivas económicas y ambientales, tomando en cuenta los costos de producción y el beneficio ambiental, los PPL son una opción sustentable para evitar la confinación de los jales.

VIII. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

El presente estudio muestra resultados en base a los jales generados en la Mina de Plata La Guitarra, sin embargo los resultados no pueden ser generalizables debido a las diferentes características que pueden presentar dichos residuos peligrosos.

La NOM-141-SEMARNAT-2003 menciona **"El producto de la oxidación de los sulfuros metálicos es ácido sulfúrico"** no obstante, no da a conocer los reactivos y los productos de esta reacción química; debido a esto, es importante tomar en cuenta la producción de H^+ y H_2SO4 que se generan, con la finalidad de conocer más a fondo los métodos de prevención y neutralización de Drenaje Ácido.

Si se desea realizar experimentos con jales que presenten concentraciones de metales pesados que sobrepasen los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, es imprescindible tener en cuenta que los procesos de reducción-oxidación de estos componentes manifiestan un alto grado de complejidad y por lo tanto es difícil predecir su comportamiento en el ambiente. Es recomendable no exponer productos fabricados con jales que contengan metales pesados a través de materiales para la construcción, sin previamente haber evaluado el grado de estabilización de estos elementos.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Alcocer, Sergio M.; Carrillo, Julián y Aperador, William. (2013). Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. Ingeniería. Investigación y Tecnología, Abril-Junio, 285-298.

2. Baquero, K.; Molina, J. y Blandón, A. (2012). Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas. Ingeniería y Competitividad,Sin mes, 147-160.

3. Belmonte Serrato, Francisco; Romero Díaz, Asunción y Moreno Brotóns, Jesús. (2010). Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la sierra minera de Cartagena-la unión (sureste de España). Cuadernos de Turismo, Enero-Junio, 11-24.

4. Botin, Jose A. (2010). Integrating Sustainability Down To The Operational Levels Of A Mining Company. Dyna, Marzo-Sin Mes, 43-49.

5. Carrillo-Chávez, Alejandro; Levresse, Gilles; Méndez-Ortiz, Blanca Adriana y Monroy-Fernández, Marcos Gustavo. (2012). Influencia del pH y la alcalinidad en la adsorción de As y metales pesados por oxihidróxidos de Fe en jales mineros de tipo skarn de Pb-Zn-Ag. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Noviembre-Sin mes, 639-648.

6. Çengel, Y. A. (2011). Transferencia De Calor Y Masa. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

7. China Mining. (2015). La carta de invitación de la 17ª Conferencia y Exposición de Minería de China en 2015. Recuperado de http://www.chinaminingtj.org/esp/index.php/informaciones-basicas.

8. Coll-Hurtado, Atlantida; Sánchez-Salazar María y Morales, Josefina. (2002).LA MINERÍA EN MÉXICO, geografía, historia, economía, y medio ambiente. Instituto de Geografía, UNAM.

9. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2013). Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética Vigentes. Recuperado en 25 de junio de 2016, de: https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes.

10. Consejo Minero. (2013). Reporte Anual 2013-2013. Recuperado de http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2013/09/Reporte-Anual-CM-2012-2013.pdf.

11. Diario Oficial de la Federación. (2010). DECLARATORIA de vigencia de las normas mexicanas NMX-C-125-ONNCCE-2010, NMX-C-126-ONNCCE-2010, NMX-C-189-ONNCCE-2010, NMX-C-210-ONNCCE-2010, NMX-C-213-ONNCCE-2010, NMX-C-228-ONNCCE-2010, NMX-C-238-ONNCCE-2010, NMX-C-258-ONNCCE-2010 y NMX-C-450-ONNCCE-2010. Recuperado en 27 de junio de 2016, de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5162160&fecha=06/10/2010.

12. Español Cano, Santiago. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. Biomédica, Septiembre-Sin mes.

13. Espinosa Cancino, C F y Cortés Fuentes, A. (2015). Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. Revista INVI, 30() 227-242. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25842618008

14. First Majestic Silver Corp. (2015). Mina de Plata La Guitarra. Recuperado de http://www.firstmajestic.com/esp/projects/producing-mines/la-guitarra.

15. Flores, Hugo; Frabotta, Daniela; Retamar, Juan C.; Orué, Silvio; Belis, Eliana y Schneider, Alfredo. (2015). Determinación De Densidad Aparente En

Aglomerado Aislante. Facultad de Ingeniería Química – U. N. L. Recuperado de: http://documents.mx/documents/determinacion-de-densidad-aparente-en-aglomerado-aislantepdf.html.

16. Flores, Silvana L.; Arévalo, Walter y Romero, Alfonso A. (2010). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. Industrial Data, Enero-Julio, 85-90.

17. Flores, Silvana L. y Romero, Alfonso A. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas.Industrial Data, Julio-Sin mes, 75-82.

18. Fonseca Diaz, N y Tibaquirá, J E. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R. Scientia Et Technica, XIV() 464-469. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920503085.

19. Franco-Sepúlveda, Giovanni; Romero-Gélvez, Jorge Iván y Cortes-Aldana, Félix Antonio. (2015). Compromise solutions in mining method selection - case study in colombian coal mining. Dyna, Junio-Sin mes, 127-136.

20. Giraldo M., Manuel Alejandro y Tobón, Jorge Iván. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Dyna, marzo, 69-81.

21. Godinez, Luis; Ramirez, Marcela; Guerra, Ricardo; Rodríguez, Francisco; Avelar, Javier; Yamamoto, Laura; Medel-Reyes, Alejandro y Ramos-Gómez, Magdalena. (2012). Movilidad de Metales en Jales Procedentes del Distrito Minero de Guanajuato, México. Revista Internacional De Contaminación Ambiental, Sin Mes, 49-59.

22. González-Sánchez y Francisco, & Camprubí, Antoni. (2010). La pequeña minería en México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(1), 100-108.

Recuperado en 09 de marzo de 2016, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100006&lng=es&tlng=es.

23. Gutiérrez, Margarita Eugenia; Armienta, María Aurora; Villaseñor, Guadalupe y Romero, Francisco Martín. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Sin mes, 43-54.

24. Hernández Silva, Gilberto; Ramírez Islas, Martha Elena; García Martínez, Rocío; Martínez Reyes, Juventino; Solorio Munguía, Gregorio; Solís Valdez, Sara y Martínez-Trinidad, Sergio. (2013). Total mercury in terrestrial systems (air-soil-plant-water) at the mining region of San Joaquín, Queretaro, Mexico. Geofísica Internacional, Enero-Marzo, 43-58.

25. Hurtado, Jasmin y Berastain, Arturo. (2012). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. Revista Peruana de Biología, Agosto, 187-192.

26. Instituto de ingenieros de Minas del Perú. (2015). Australia: líder en tecnología para el sector minero. Recuperado de http: //www.mineriaonline.com.pe/pagedeta.asp ?idtipo=6&idpage=1385#.

27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Producto Interno Bruto a Precios Corrientes, Cifras Durante el Tercer Trimestre de 2015. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/notasinformativas/2015/pib_precr/pib_precr2015_11.pdf.

28. Kumar Pal, A.; Roy, P.; Kumar Sikdar, P. y Singh, G. (2012). Source apportionment of ambient PM10. A case study from a mining belt of Orissa. Atmósfera, Sin mes, 311-324.

29. La Jornada Ecológica. (2013). El auge de la minería…nos enseña el cobre. Recuperado de http://www.jornada.unam.mx/2013/04/08/eco-cara.html.

30. Lorenzo, Henrique; Arias, Pedro y Álvarez-Campana, José Manuel. (2010). Sustainable Mining In The XXI Century. Dyna, Marzo-Sin Mes,

31. Molina Escobar, Jorge Martín y Restrepo Baena, Oscar Jaime. (2010). Colombian Mining Sustainability. Dyna, Marzo-Sin Mes, 149-151.

32. Morales, Carolina; Tapia, Jaime; Balocchi, Francisco; Pizarro, Roberto; Valdés-Pineda, Rodrigo; Flores, Juan P.; Sangüesa, Claudia; González, David y León, Lastenia. (2016). Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Octubre-Sin mes, 29-43.

33. Oblasser, Angela y Chaparro, Eduardo. (2008). Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. Santiago de Chile: Editorial CEPAL.

34. Olmos, Jesús; Gavilán-García, Irma; Suárez, Sara; Tovar-Gálvez, Luis R.; Gavilán-García, Arturo y Santos-Santos, Elvira. (2008). Mercury Speciation in Contaminated Soils from Old Mining Activities in Mexico Using a Chemical Selective Extraction. Journal of the Mexican Chemical Society, Sin mes, 263-271.

35. Panesar, D. K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. Construction and Building Materials, 44, 575-584. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024.

36. Petter, Carlos Otávio; Valle Antunes Jr, José Antonio y Flamarion Klippel, Altair. (2008). Lean Management Implementation In Mining Industries. Dyna,Marzo-Sin Mes, 81-89.

37. Plumlee, G.S.; Logsdon MJ. y Filipek L.F. (1999). The environmental geochemistry of mineral deposits. Processes, Techniques, and Health: Reviews in Economic Geology.

38. Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association. (2011). Moisture sorption of building materials. Pima technical bulletin #404. Recuperado de http://c.ymcdn.com/sites/www.polyiso.org/resource/resmgr/technical_bulletins/tb404_nov11.pdf.

39. Ramos Gomez, Samanta; Medel Reyes, Alejandro; Mora Tovar, Luis Arturo Godínez; Rodríguez Valadez, Francisco y Avelar González, Francisco Javier (2008). Caracterización de Jales Mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. Conciencia Tecnológica, enero-junio, 32-35.

40. Ríos, Rafael y San Bartolomé, Ángel. (2013). Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, julio-diciembre, 2-16.

41. Ríos-Reyes, Carlos Alberto; Jaramillo-Pérez, Eliana Rocío y Plata-Chaves, Josue Mauricio. (2014). The use of gypsum mining by-product and lime on the engineering properties of compressed earth blocks. Dyna, Diciembre-Sin mes, 42-51.

42. Roca, Antonio; Rivera, Isauro; Reyes, Iván A.; Juárez, Guillermo; Patiño, Francisco y Reyes, María I. (2012). Silver Precipitation Using Sodium Dithionite in Cyanide Media. Journal of the Mexican Chemical Society, Abril-Junio, 156-162.

43. Rodríguez, Xosé A. (2010). A New Productivity Index To Measure Economic Sustainability Of The Mining Industry. Dyna, Marzo-Sin Mes, 11-20.

44. Romero Baylón, Alfonso; Medina Sandoval, Rosa y Flores Chávez, Silvana. (2009). Obtención de metales preciosos a partir de residuos sólidos mineros o relave. Industrial Data,Enero-Junio, 41-46.

45. Romero, Francisco Martín y Pérez-Martínez, Isabel. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, . 1-12.

46. Rosiles, René; Castro-Díaz, José; Suárez, Sara; Santos-Santos, Elvira; Yarto-Ramírez, Mario; Gavilán-García, Arturo; López-Villegas, Tania y Gavilán-García, Irma. (2006). Analysis of Arsenic, Lead and Mercury in Farming Areas with Mining Contaminated Soils at Zacatecas, Mexico. Journal of the Mexican Chemical Society, . 57-63.

47. Roux Gutiérrez, R S y Garcia Izaguirre, V M. (2014). Confort térmico versus consumo energético en viviendas de interés social en clima cálido húmedo.Revista Legado de Arquitectura y Diseño, () 123-140. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947304009.

48. Salamanca Correa, Rodrigo. (2001). Aplicación del cemento portland y los cementos adicionados. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Julio, 33-38.

49. Secretaría de Economía. (2013). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2012. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/O_Anuario_2012_Edicion%202013.pdf

50. Secretaría de Economía. (2014). Panorama Minero del Estado de México. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/pdfs/EDO_MEXICO.pdf.

51. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). Guía para conocer los principales trámites y permisos ambientales en las diferentes etapas del proceso minero. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

52. Siebe Grabach, Christina Desireé; Ramos Arroyo, Yann René y Prol Ledesma, Rosa María. (2004). Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, . 268-284.

53. Sika Fiber. (2010). Fibra de polipropileno para refuerzo secundario del concreto. Hoja técnica. Edición 1,2010. Recuperado en 24 de junio de 2016, de: http://www.sage.com.mx/intro/fichas/fibra-polipropileno-refuerzo-concreto-sika-fiber.pdf

54. Solís-López, M.; Ramírez-Zamora, R.M.; Schouwenaars, R. y Espejel-Ayala, F. (2015). Síntesis de zeolita p utilizando jales de cobre. Revista Mexicana de Ingeniería Química, . 205-212.

55. Sosa, Manuel; Pinedo, Carmelo; de la Mora, Antonio; Jiménez, Jorge y Puga, Soraya. (2006). Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales.Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Sin mes, 75-82.

56. The Australasian Institute Of Mining And Metallurgy. (2012). Del Editor. Water In Mining. Dyna, Diciembre-Sin Mes.

57. Torre De Palacios, Luis De La. (2011). Natural Resources Sustainability: Iron Ore Mining. Dyna, Diciembre-Sin Mes, 227-234.

58. Torres Agredo, Janneth; Trochez Serna, Jenny J. y Mejía de Gutiérrez, Ruby (2012). Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland. Ingeniería y Ciencia, Enero-Junio, 141-156.

59. Valencia, G. (2006). Juntas en edificios de acero. Ingeniería e Investigación, 26() 69-77. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326108

60. Vélez, Ligia M. (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. Tecno Lógicas, Diciembre-Sin mes, 169-187.

61. Villegas, C. F. C. (2001). Contabilidad de costos. Pearson Educación.

62. Vintró, Carla y Comajuncosa, Josep. (2010). Corporate Social Responsibility In The Mining Industry: Criteria And Indicators. Dyna, Marzo-Sin Mes, 31-41.

X. ANEXOS

Anexo 1.- Porcentajes utilizados en el diseño de superficie de respuesta

Experimento	Cemento %	Jales %	Agua%	Sellador vinílico %	Espumante %
1	27.5	37.5	13	4	5.5
2	22.5	37.5	19	4	5.5
3	27.5	37.5	19	4	5.5
4	30	30	22	3	6
5	27.5	37.5	19	4	4.5
6	27.5	37.5	19	4	6.5
7	27.5	37.5	19	6	5.5
8	27.5	52.5	19	4	5.5
9	32.5	37.5	19	4	5.5
10	30	30	16	5	6
11	30	45	22	5	6
12	30	45	22	3	5
13	30	30	16	3	5
14	27.5	37.5	25	4	5.5
15	27.5	37.5	19	4	5.5
16	30	45	16	3	6
17	27.5	37.5	19	2	5.5
18	25	45	22	5	5
19	30	45	16	5	5
20	25	45	22	3	6
21	27.5	22.5	19	4	5.5
22	25	45	16	5	6
23	25	30	22	3	5
24	25	30	16	3	6
25	25	45	16	3	5
26	25	30	22	5	6
27	30	30	22	5	5
28	25	30	16	5	5

Anexo 2. Cantidades de insumos utilizados en el diseño de superficie de respuesta

Experimento	Cemento (g)	Jales (g)	Agua (mL)	Agua p/espumante (mL)	Espumante (mL)	Sellador vinílico (mL)
1	137.5	187.5	65	27.5	1.375	20
2	112.5	187.5	95	27.5	1.375	20
3	137.5	187.5	95	27.5	1.375	20
4	150	150	110	30	1.5	15
5	137.5	187.5	95	22.5	1.125	20
6	137.5	187.5	95	32.5	1.625	20
7	137.5	187.5	95	27.5	1.375	30
8	137.5	262.5	95	27.5	1.375	20
9	162.5	187.5	95	27.5	1.375	20
10	150	150	80	30	1.5	25
11	150	225	110	30	1.5	25
12	150	225	110	25	1.25	15
13	150	150	80	25	1.25	15
14	137.5	187.5	125	27.5	1.375	20
15	137.5	187.5	95	27.5	1.375	20
16	150	225	80	30	1.5	15
17	137.5	187.5	95	27.5	1.375	10
18	125	225	110	25	1.25	25
19	150	225	80	25	1.25	25
20	125	225	110	30	1.5	15
21	137.5	112.5	95	27.5	1.375	20
22	125	225	80	30	1.5	25
23	125	150	110	25	1.25	15
24	125	150	80	30	1.5	15
25	125	225	80	25	1.25	15
26	125	150	110	30	1.5	25
27	150	150	110	25	1.25	25
28	125	150	80	25	1.25	25

Anexo 3. Datos para el cálculo de densidad

Experimento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Profundidad (cm)	Peso	Densidad Kg/m3
1	25.5	14	1.27	354.47	0.78
2	25.5	14	1.27	291.42	0.64
3	25.5	14	1.27	285.67	0.63
4	25.5	14	1.27	253.08	0.56
5	25.5	14	1.27	345.27	0.76
6	25.5	14	1.27	264.94	0.58
7	25.5	14	1.27	306.58	0.68
8	25.5	14	1.27	370.43	0.82
9	25.5	14	1.27	258.39	0.57
10	25.5	14	1.27	243.96	0.54
11	25.5	14	1.27	278.13	0.61
12	25.5	14	1.27	306.64	0.68
13	25.5	14	1.27	310.53	0.68
14	25.5	14	1.27	311.77	0.69
15	25.5	14	1.27	294.73	0.65
16	25.5	14	1.27	346.13	0.76
17	25.5	14	1.27	311.31	0.69
18	25.5	14	1.27	328.69	0.72
19	25.5	14	1.27	550.43	1.21
20	25.5	14	1.27	297.76	0.66
21	25.5	14	1.27	269.1	0.59
22	25.5	14	1.27	371.15	0.82
23	25.5	14	1.27	308.51	0.68
24	25.5	14	1.27	279.68	0.62
25	25.5	14	1.27	386.8	0.85
26	25.5	14	1.27	264.78	0.58
27	25.5	14	1.27	279.29	0.62
28	25.5	14	1.27	303.24	0.67

Anexo 4. Datos para el cálculo de la conductividad térmica

Experimento	Watts	Espesor	Área m2	T° Interior		T° Exterior		Tiempo	Gradiente T°	W/m*K
				Inicial	Final	Inicial	Final			
1	40	0.0127	0.04	105	124.3	28	36.8	00:05	87.5	0.1451
2	40	0.0127	0.04	106	111	35.9	35	00:05	76	0.1671
3	40	0.0127	0.04	108	122.3	28	36	00:05	86.3	0.1472
4	40	0.0127	0.04	108	124.6	27	38.5	00:05	86.1	0.1475
5	40	0.0127	0.04	105	118.1	28	36.7	00:05	81.4	0.1560
6	40	0.0127	0.04	105	117	27	37	00:05	80	0.1588
7	40	0.0127	0.04	107	124	29	37.3	00:05	86.7	0.1465
8	40	0.0127	0.04	109	125.1	29	37	00:05	88.1	0.1442
9	40	0.0127	0.04	101	127.6	28	40	00:05	87.6	0.1450
10	40	0.0127	0.04	109	127.6	29	40	00:05	87.6	0.1450
11	40	0.0127	0.04	104	114.4	26	36	00:05	78.4	0.1620
12	40	0.0127	0.04	102	117.9	26	34.5	00:05	83.4	0.1523
13	40	0.0127	0.04	109	124.6	29	38.6	00:05	86	0.1477
14	40	0.0127	0.04	108	125.9	28	38.8	00:05	87.1	0.1458
15	40	0.0127	0.04	102	121.1	29	38.3	00:05	82.8	0.1534
16	40	0.0127	0.04	104	115.1	29	35.9	00:05	79.2	0.1604
17	40	0.0127	0.04	110	128.1	27	37.6	00:05	90.5	0.1403
18	40	0.0127	0.04	108	118.5	30	35.7	00:05	82.8	0.1534
19	40	0.0127	0.04	102	113.5	27	33.6	00:05	79.9	0.1589
20	40	0.0127	0.04	104	116.9	27	38.8	00:05	78.1	0.1626
21	40	0.0127	0.04	105	117.8	29	36.3	00:05	81.5	0.1558
22	40	0.0127	0.04	102	119	27	35.4	00:05	83.6	0.1519
23	40	0.0127	0.04	108	119.6	34	34.9	00:05	84.7	0.1499
24	40	0.0127	0.04	106	116.4	35.9	37.7	00:05	78.7	0.1614
25	40	0.0127	0.04	101	113.8	28	34.1	00:05	79.7	0.1593
26	40	0.0127	0.04	105	114	28	34.8	00:05	79.2	0.1604
27	40	0.0127	0.04	108	119.8	29	37.4	00:05	82.4	0.1541
28	40	0.0127	0.04	102	113.5	46	36.6	00:05	76.9	0.1651

Anexo 5. Datos para el cálculo de la PVA

Experimento	(g) perdidos de agua	Tiempo en horas	Área m2	Presión atmosférica mm Hg	% Humedad relativa del plato	% Humedad relativa de la camara
1	127.47	240	0.035	35.70	49	0
2	79.79	240	0.035	35.70	49	0
3	148.46	240	0.035	35.70	49	0
4	115.42	240	0.035	35.70	49	0
5	114.78	240	0.035	35.70	49	0
6	94.69	240	0.035	35.70	49	0
7	107.76	240	0.035	35.70	49	0
8	156.48	240	0.035	35.70	49	0
9	197	240	0.035	35.70	49	0
10	112.09	240	0.035	35.70	49	0
11	92.76	240	0.035	35.70	49	0
12	266.17	240	0.035	35.70	49	0
13	108.95	240	0.035	35.70	49	0
14	89.16	240	0.035	35.70	49	0
15	123.9	240	0.035	35.70	49	0
16	263.05	240	0.035	35.70	49	0
17	89.8	240	0.035	35.70	49	0
18	169.57	240	0.035	35.70	49	0
19	176.33	240	0.035	35.70	49	0
20	89.13	240	0.035	35.70	49	0
21	240.32	240	0.035	35.70	49	0
22	96.64	240	0.035	35.70	49	0
23	204.42	240	0.035	35.70	49	0
24	315.75	240	0.035	35.70	49	0
25	108.94	240	0.035	35.70	49	0
26	79.93	240	0.035	35.70	49	0
27	281.58	240	0.035	35.70	49	0
28	107.26	240	0.035	35.70	49	0