



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICA DE 8 MUESTRAS DE PUZOLANAS DE
ORIGEN VOLCÁNICO DE LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE GUATEMALA**

Luis Alfredo Ochoa Marroquín

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, abril de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICA DE 8 MUESTRAS DE PUZOLANAS DE
ORIGEN VOLCÁNICO DE LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ALFREDO OCHOA MARROQUÍN

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Juan Carlos Molina Jiménez |
| VOCAL V | Br. Mario Maldonado Muralles |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz |
| EXAMINADOR | Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez |
| EXAMINADOR | Ing. Joel Eduardo Guerrero Spínola |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICA DE 8 MUESTRAS DE PUZOLANAS DE ORIGEN VOLCÁNICO DE LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 4 de noviembre de 2010.

Luis Alfredo Ochoa Marroquín



Guatemala, 15 de marzo de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala”**, desarrollado por el estudiante universitario **Luis Alfredo Ochoa Marroquín**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Ochoa Marroquín** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941
Asesor

FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ
Ingeniero civil colegiado No. 1941



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala, 19 de marzo de 2012

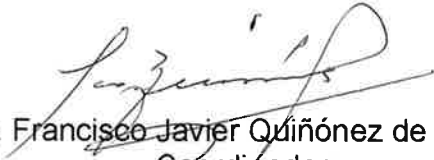
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala”**, desarrollado por el estudiante universitario **Luis Alfredo Ochoa Marroquín**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Ochoa Marroquín** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Coordinador

Unidad de Investigación Escuela de Ingeniería Civil -UIEIC-



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Luis Alfredo Ochoa Marroquín, titulado CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICA DE 8 MUESTRAS DE PUZOLANAS DE ORIGEN VOLCÁNICO DE LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, abril de 2012

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICA DE 8 MUESTRAS DE PUZOLANAS DE ORIGEN VOLCÁNICO DE LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Alfredo Ochoa Marroquín**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large oval loop and a vertical line with a small flourish at the bottom.

Ing. Murphy Glympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, abril de 2012



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Luis Alfredo Ochoa Marroquín y Rosa María Marroquín de Ochoa, por su amor y apoyo incondicional.
- Mi hermana** Luz María, por todo su cariño y por ser el mejor vínculo entre mi pasado y mi presente.
- Mis amigos** Por estar conmigo siempre en especial a Borgy Henry, Flor Roldán, Luis Mejía, Óscar Castillo, José Hernández, Alejandro y Efraín Estrada, Bernie Cubur, Gerardo Gómez y Víctor Rosales.
- Pueblo de Guatemala** Inmerso en este imperio.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|--|
| Dios | Por todas sus bendiciones. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Especialmente a la Facultad de Ingeniería, por mi formación académica y ese orgullo de pertenecer a ella. |
| Ing. Francisco Javier Quiñónez | Sin su guía, sus enseñanzas y sus conocimientos, este trabajo jamás se hubiera podido realizar. |
| Ing. Mario Corzo | Por compartir sus conocimientos sin egoísmo y preocuparse porque lleguemos a ser buenos profesionales. |
| Sección de Ecomateriales y Estructuras | A don Fabio Sánchez y a todos los practicantes que han pasado por ahí, con los que he compartido muy buenos momentos. |
| Laboratorio de análisis Físico-químicos | Lic. Ingrid Benítez, María Fernanda Terraza y Carolina Corzo, por toda su ayuda en los ensayos químicos y la interpretación de los mismos. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| INTRODUCCIÓN..... | XVII |
| | |
| 1. LAS PUZOLANAS | 1 |
| 1.1. Definición de puzolanas | 1 |
| 1.1.1. Clasificación de puzolanas | 2 |
| 1.1.2. Clasificación de sistemas basados en la química/mineralogía | 2 |
| 1.1.2.1. Puzolanas artificiales | 3 |
| 1.1.2.2. Puzolanas naturales | 3 |
| 1.1.3. Sistema de clasificación en base al comportamiento .. | 7 |
| 1.2. Las puzolanas como aglomerantes | 9 |
| 1.3. Las puzolanas en el territorio de Guatemala | 15 |
| 1.4. Las puzolanas en la región occidente de Guatemala | 22 |
| 1.4.1. Rocas cenozoicas | 22 |
| 1.4.2. Sedimentos volcánicos | 26 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | 29 |
| 2.1. Localización de bancos potenciales | 29 |
| 2.2. Muestreo | 30 |
| 2.3. Preparación de muestras | 30 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3.1. | Trituración | 31 |
| 2.3.2. | Secado al sol | 31 |
| 2.3.3. | Secado al horno | 31 |
| 2.3.4. | Molienda | 31 |
| 2.4. | Procedimientos de ensayo | 32 |
| 2.4.1. | Determinación en laboratorio del contenido de humedad en las muestras del material en estudio ... | 32 |
| 2.4.1.1. | Procedimiento | 32 |
| 2.4.1.2. | Cálculo | 33 |
| 2.4.2. | Tamiz de ¼" | 33 |
| 2.4.3. | Tamiz No. 30 y No. 200 | 34 |
| 2.4.3.1. | Procedimiento | 34 |
| 2.4.3.2. | Cálculo | 35 |
| 2.4.4. | Tamiz No. 325 | 35 |
| 2.4.4.1. | Procedimiento | 35 |
| 2.4.4.2. | Cálculo | 36 |
| 2.4.5. | Densidad del cemento hidráulico | 37 |
| 2.4.5.1. | Procedimiento | 38 |
| 2.4.5.2. | Cálculo | 39 |
| 2.4.6. | Finura del cemento hidráulico por el aparato de permeabilidad al aire | 39 |
| 2.4.6.1. | Calibración del aparato | 40 |
| 2.4.6.2. | La prueba de permeabilidad | 44 |
| 2.4.6.3. | Procedimiento | 45 |
| 2.4.6.4. | Cálculo | 46 |
| 2.4.7. | Fracción soluble en agua | 49 |
| 2.4.7.1. | Procedimiento | 49 |
| 2.4.7.2. | Cálculo | 50 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.4.8. | Pérdida por ignición | 50 |
| 2.4.8.1. | Procedimiento | 50 |
| 2.4.8.2. | Cálculo | 51 |
| 2.5. | Interpretación de resultados | 51 |
| 2.6. | Redacción del contenido del trabajo | 51 |
| 3. | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN LAS MUESTRAS DE PUZOLANAS SEGÚN NORMAS DE LA SOCIEDAD AMERICANA PARA PRUEBAS DE MATERIALES –ASTM– | 53 |
| 3.1. | Ubicación de bancos potenciales | 53 |
| 3.2. | Obtención de muestras | 55 |
| 3.2.1. | Recorrido preliminar | 55 |
| 3.2.2. | Recorrido para extracción de muestras | 69 |
| 3.3. | Resultados en las muestras antes de la molienda | 76 |
| 3.3.1. | Determinación del contenido de humedad de las muestras | 76 |
| 3.3.2. | Tamiz de ¼” | 77 |
| 3.3.3. | Tamiz No. 30 y No. 200 | 78 |
| 3.3.4. | Molienda de las muestras | 81 |
| 3.4. | Resultados en las muestras después de la molienda | 82 |
| 3.4.1. | Tamiz No. 325 | 82 |
| 3.4.2. | Densidad del cemento hidráulico | 86 |
| 3.4.3. | Finura del cemento hidráulico por el aparato de permeabilidad al aire | 88 |
| 3.4.4. | Fracción soluble en agua | 92 |
| 3.4.5. | Pérdida por ignición | 94 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 97 |
| 4.1. | De la ubicación de bancos potenciales | 97 |
| 4.1.1. | De la ubicación de los bancos | 100 |
| 4.2. | De los resultados de ensayos | 101 |
| | CONCLUSIONES | 105 |
| | RECOMENDACIONES | 109 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 111 |
| | APÉNDICE | 113 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Dimensiones del Balón de Le Chatelier | 37 |
| 2. | Aparato de permeabilidad al aire | 40 |
| 3. | Banco de suelo granítico | 55 |
| 4. | Área plana formada por rellenos de pómez cuaternaria | 56 |
| 5. | Banco de extensa cuenca de pómez cuaternaria | 57 |
| 6. | Depósito de pómez fina y fragmentos de hasta 50 cm de diámetro | 58 |
| 7. | Vista oriental del valle de Quetzaltenango | 59 |
| 8. | Banco de pómez cuaternaria ubicada en San Francisco el Alto | 60 |
| 9. | Banco explotado para la fabricación de bloques para la construcción | 61 |
| 10. | Banco con franjas alternas de lapilli grueso y fino | 62 |
| 11. | Banco fuertemente explotado ubicado en Nahualá, Sololá | 63 |
| 12. | Banco de pómez cuaternaria de la más común, ubicada en Argueta, Sololá | 64 |
| 13. | Banco con una altura aproximada de 40 m ubicado en Tecpán | 65 |
| 14. | Banco con abundante material suelto | 66 |
| 15. | Banco en el que se observa carbón vegetal natural | 67 |
| 16. | Banco pequeño de pómez cuaternaria | 68 |
| 17. | Banco fuertemente explotado para la venta de materiales de construcción | 69 |
| 18. | Banco de donde se extrajo la muestra 1N | 71 |
| 19. | Banco de donde se extrajeron las muestras 2TF y 2T'G | 72 |
| 20. | Banco de donde se extrajo la muestra LC | 73 |

| | | |
|-----|---|----|
| 21. | Banco de donde se extrajo la muestra 1C | 74 |
| 22. | Banco de donde se extrajo la muestra Bar F | 75 |
| 23. | Muestra del material dentro del horno | 76 |
| 24. | Tamiz No. 30 sobre el tamiz No. 200 | 79 |
| 25. | Lavado del tamiz No. 30 sobre el tamiz No. 200 | 79 |
| 26. | Molino de bolas en funcionamiento | 81 |
| 27. | Bolas de dos diámetros distintos dentro del molino..... | 81 |
| 28. | Extracción de muestra a cada hora de molienda | 82 |
| 29. | Humedecimiento de los 2 g de muestra | 83 |
| 30. | Ajuste de la presión del aspersor de agua a 10 psi. | 83 |
| 31. | Lavado de la muestra mediante movimientos circulares | 84 |
| 32. | Llenado del matraz con keroseno | 86 |
| 33. | Colocación de la muestra dentro del matraz | 87 |
| 34. | Colocación del matraz dentro del baño María | 87 |
| 35. | Calibración de celda para ensayo de permeabilidad al aire | 90 |
| 36. | Peso de la celda + cemento + mercurio para ensayo de permeabilidad al aire | 90 |
| 37. | Peso de la muestra a ensayar en aparato de permeabilidad al aire | 91 |
| 38. | Realización del ensayo de permeabilidad al aire..... | 91 |
| 39. | Realización del ensayo fracción soluble en agua | 93 |
| 40. | Crisol conteniendo la muestra para realizar el ensayo de pérdida por ignición | 94 |
| 41. | Mufla utilizada para realizar el ensayo de pérdida por ignición | 95 |

TABLAS

| | | |
|--------|--|----|
| I. | Mapas utilizados en la investigación | 53 |
| II. | Ubicación y dimensionamiento de los bancos | 54 |
| III. | Datos del banco identificado como SFA | 70 |
| IV. | Datos del banco identificado como SX1G y SX2F | 70 |
| V. | Datos del banco identificado como 1N | 71 |
| VI. | Datos del banco identificado como 2TF y 2T'G | 72 |
| VII. | Datos del banco identificado como LC | 73 |
| VIII. | Datos del banco identificado como 1C | 74 |
| IX. | Datos del banco identificado como Bar F. | 75 |
| X. | Contenido de humedad de las muestras | 77 |
| XI. | Porcentaje que pasa el tamiz de ¼" | 78 |
| XII. | Porcentaje que pasa el tamiz No. 30..... | 80 |
| XIII. | Porcentaje que pasa el tamiz No. 200..... | 80 |
| XIV. | Porcentaje que pasa el tamiz No. 325..... | 85 |
| XV. | Densidad de las muestras | 88 |
| XVI. | Datos para la 1ª calibración de la celda | 89 |
| XVII. | Datos para la 2ª calibración de la celda | 89 |
| XVIII. | Datos de permeabilidad al aire de las muestras..... | 92 |
| XIX. | Resultados de la fracción soluble en agua de las muestras..... | 93 |
| XX. | Resultados de la pérdida por ignición de las muestras | 95 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------------|----------------------------------|
| cm | Centímetros |
| cc | Centímetros cúbicos |
| H | Contenido humedad muestra (%) |
| C | Factor de Corrección |
| g | Gramo |
| °C | Grados centígrados |
| kg | Kilogramos |
| km | Kilómetros |
| M_w | Masa de agua |
| M_s | Masa de la muestra |
| R_s | Material retenido en ensayo en g |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| µm | Micrómetro |
| ml | Mililitros |
| mm | Milímetro |
| N | Norte |
| W | Oeste |
| R_c | Porcentaje retenido corregido |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------|--|
| Árido | Material granulado utilizado en construcción. |
| Basalto | Roca ígnea volcánica de composición máfica, de color oscuro, rico en hierro y magnesio. |
| Circunpacífico | Cinturón de Fuego del Pacífico. |
| Conglomerantes | Material que sirve para unir fragmentos o partículas de una o más sustancias y compactarlas, formando una sola masa. |
| Hidraulicidad | Numéricamente definido como la relación en peso de los silicatos, aluminatos y óxidos de hierro respecto del óxido de cal y de magnesio. |
| Lávicas | Mezcla de gases y sólidos eyectados en algunas erupciones de volcanes. |
| Meridiano | Semicírculos máximos de la esfera terrestre que pasan por los polos. |
| Molienda | Proceso en el cual se reduce la fineza de un material. |

| | |
|------------------------|--|
| Paleomagnetismo | Estudio del campo magnético de la tierra en el pasado. |
| Piroclástico | Magma que durante su ascenso a través de la corteza terrestre alcanza la superficie. |
| Porfídicas | Fenocristales relativamente grandes, situados en una masa de grano más fino. |
| Silicatos | Sales de ácido Silícico. |
| Surcada | Participio del verbo surcar que significa atravesar o desplazarse navegando a través del agua, aire o espacio. |
| Vítreas | Semejante al vidrio. |

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta una descripción general de la geología de la franja volcánica occidental de Guatemala, y resultados de la caracterización física de 8 muestras extraídas de bancos ubicados dentro del área delimitada en el Mapa Geológico de Guatemala, como rellenos y cubiertas gruesas de cenizas, pómez de origen diverso (rocas ígneas y metamórficas del Período Cuaternario). Se presenta una descripción de las puzolanas y de la ubicación del material en la zona occidental del país, para lo cual se tomaron como base las publicaciones anteriormente realizadas. Luego de hacer la investigación geológica se decidió incluir una muestra más que también presentó características para clasificarla como puzolana.

Se hace una descripción de la forma en que se realizó la localización de los bancos potenciales donde se encontró el material, los viajes realizados para la recolección e identificación de las muestras y la descripción detallada sobre cómo fueron hechos los ensayos, así como el cálculo de los resultados. Se enlistan los resultados de los ensayos, acompañados de fotografías que ilustran parte del procedimiento que se siguió para su realización. En la parte final del trabajo se presenta un análisis de la información de campo y de laboratorio.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación FODECYT número 023-2010, que se realiza en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Establecer las características geológicas y físicas de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico, de la región de occidente de Guatemala.

Específicos

1. Recopilar información geológica de las puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala.
2. Determinar las características geológicas de los lugares donde se tomarán las muestras de puzolana de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala.
3. Identificar las características físicas de las muestras de puzolana de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

La frontera del Pacífico de América Central posee una estructura geológica y topografía formada por una extensión de grandes volcanes jóvenes y en muchos casos muy violentos; formando una cadena de 101 volcanes de primer orden, con una extensión de casi 1100 Km desde la frontera entre México y Guatemala hasta el volcán Turrialba en Costa Rica. La cordillera central de Guatemala es el corazón de esta cadena montañosa en el noreste de Centro América. Estas características, sumadas a la actividad volcánica, han propiciado que Guatemala sea un país que cuenta con una riqueza enorme de materiales piroclásticos depositados, en su gran mayoría, en la zona central y occidental.

Este trabajo de investigación presenta una descripción general de la geología del territorio occidental de Guatemala. También la caracterización física de 9 muestras extraídas de bancos ubicados dentro del área delimitada en el Mapa Geológico de Guatemala como puzolanas cuaternarias. Es necesario hacer la aclaración que en un principio iban a ser solamente 8 muestras, tal como lo indica el título de este trabajo, pero luego de hacer la investigación geológica se decidió incluir una muestra más que también presentó características para clasificarla como puzolana.

En el primer capítulo titulado “Las Puzolanas”, se hace una descripción de este material y los distintos tipos de clasificación que existen, así como su uso y aplicaciones desde tiempos del imperio romano. Se hace una descripción de la ubicación de este material en la zona occidental del país y para esto se utilizaron como base las publicaciones de investigadores como Sapper, Bonnis,

Dengo, Arriaga y Quiñónez, quienes anteriormente realizaron exploraciones en el territorio guatemalteco.

En el segundo capítulo titulado “Metodología”, se hace una descripción de la forma en que se realizó la localización de los bancos potenciales donde se encontró el material, los viajes realizados, tanto el de reconocimiento como el que se hizo posteriormente para la recolección e identificación de las muestras y la descripción detallada sobre cómo se realizaron los ensayos necesarios, así como el cálculo de los resultados para la caracterización del material, siguiendo las indicaciones de las normas ASTM correspondientes.

En el tercer capítulo titulado “Resultados de los ensayos en las muestras de puzolanas según normas ASTM”, se hizo una descripción tanto del viaje preliminar como del segundo viaje, detallando los datos de los bancos visitados (kilometraje, coordenadas geográficas, altitud y una referencia del lugar) y haciendo una inspección preliminar del material se hizo una clasificación del mismo, corroborándola o corrigiéndola posteriormente, luego de realizar los ensayos. Se agregaron fotografías de los bancos para tener una referencia de sus dimensiones.

Se enlistan los resultados de todos los ensayos realizados, acompañados de fotografías que ilustran parte del procedimiento que se siguió para su realización.

En el cuarto y último capítulo titulado “Análisis de resultados”, se hace un análisis con base en lo observado en campo, la ubicación de las coordenadas de los bancos sobre el Mapa Geológico de Guatemala y una clasificación más detallada basada en los resultados obtenidos de los ensayos, corroborando o

corrigiendo la clasificación preliminar realizada en campo, presentada en el tercer capítulo de este trabajo.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación FODECYT número 023-2010, que se realiza en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Guatemala, a cuyas instituciones se agradece por la oportunidad y el apoyo brindado.

Se espera que el siguiente trabajo sirva como una herramienta de consulta a estudiantes y profesionales interesados en el tema y como una guía para la realización de futuras investigaciones relacionadas con el tema de las puzolanas.

1. LAS PUZOLANAS

1.1. Definición de puzolanas

Puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica, que proviene de la población de Puzzuoli, Italia, en las faldas del Vesubio, donde los romanos encontraron un material de origen volcánico reactivo de base silíceo, al cual ellos llamaron “pulvis puteolanus”. Posteriormente el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la puzolana de origen natural, podían tener usos sustitutivos.

Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigua Roma hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX.

La definición oficial de puzolana, se encuentra en la Especificación normalizada ASTM C595M-11 “Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos”, la puzolana debe ser: “material silíceo o silíceo aluminoso, el cual en sí mismo posee un pequeño o ningún valor cementicio, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas comunes para formar compuestos que poseen propiedades cementicias”. Esta definición ha tenido muchas críticas y debe tomarse únicamente como punto de partida y no como una verdad absoluta, pues se han encontrado puzolanas que aún saliéndose de esta definición, han proporcionado excelentes resultados.

Hammond, Day y Quiñonez, sugieren que la definición básica de una puzolana debiera ser cambiada a “un material silíceo, aluminoso y ferroso que por sí solo no es cementante, pero que bajo ciertos estados de cristalinidad y estructura, podría reaccionar con cal en presencia de humedad, a temperatura y presión normales, para formar productos cementantes”.

1.1.1. Clasificación de puzolanas

El desarrollo de sistemas de clasificación para puzolanas es un precursor del desarrollo de indicadores de reactividad y determinación de la conveniencia de puzolanas para varias aplicaciones. Como puede deducirse del análisis de la sección anterior, el término “puzolana” encierra un rango extremadamente amplio de materiales. Varía también la forma de clasificación.

Muchos sistemas de clasificación se han propuesto. Estos pueden ubicarse en dos categorías: sistemas basados en la química y mineralogía del material, y sistemas basados en la reactividad y características de comportamiento.

1.1.2. Clasificación de sistemas basados en la química/mineralogía

Day y Quiñonez mencionan que el sistema más común de clasificación utilizado en la actualidad es aquel que divide a las puzolanas en dos clases: artificiales y naturales. La clasificación entre natural y artificial no tiene un significado ingenieril real o algún propósito práctico. Respecto de la economía y comportamiento, no importa si el recurso es natural o no.

1.1.2.1. Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales incluyen materiales como la ceniza volante (*fly ash*), cenizas de altos hornos (*blast furnace slag*), *surkhi* (arcilla cocida en la India), ceniza de cascabillo de arroz (*rice husk ash*), hojas de banano quemado (*burnt banana leaves*), desechos quemados de la caña de azúcar y desechos de bauxita. Otros materiales potenciales, tales como cenizas de bagazos, suelos lateríticos y suelos tropicales rojos, los cuales requieren calcinación para inducir puzolanidad, podrían también clasificarse como puzolanas artificiales, pero si no se requiere calcinación, entonces se clasificarían como puzolanas naturales.

1.1.2.2. Puzolanas naturales

Grane, Day y Quiñónez, indican que entre las puzolanas naturales están las tobas, tierra de Santorín (ceniza volcánica), el *trass* (piroclásto romano de origen volcánico), pumicita riolítica, diatomita, gaize y tripoli (piroclásto francés de sílice amorfo).

La clasificación más simple de puzolanas naturales, las divide en dos categorías:

- Aquellas derivadas de rocas volcánicas, en las cuales el vidrio amorfo es producido por la fusión: incluyen cenizas volcánicas (pumicitas), pómez, piedra de pómez, obsidiana, escoria, tobas (puzolanas italianas y *trass* alemán) y andesitas. El *trass* es una toba.

- Aquellas derivadas de rocas y tierras opalinas. El ópalo está formado de precipitación de sílice en solución o de restos de organismos. Esta clase incluye las diatomitas (tierra de diatomeas), silex (roca silíceo densa), pizarra arcillosa y arcillas que contienen ópalo.

La reactividad de estos materiales depende primariamente de la inestabilidad química de ciertas fases como vidrio volcánico, ópalo, minerales de arcilla, zeolitas y óxidos hidratados de aluminio cuando estén presentes.

Las puzolanas naturales volcánicas clase 1 son las más reactivas y contienen cantidades sustanciales de zeolitas. Las zeolitas son formadas por la acción del agua subterránea sobre el vidrio volcánico. Los factores que influyen el proceso de zeolitización son: composición química y microestructura del material sedimentario, tamaño de partícula y distribución, pH del ambiente sedimentario, iones presentes en la solución, edad de los depósitos, presión, temperatura y composición de fluidos intersticiales.

Las rocas volcánicas pueden ser clasificadas como alteradas e inalteradas. Las rocas inalteradas pueden ser usadas como piedras naturales si existen en forma compacta. Ejemplos de estas son el basalto, la andesita, riolita, traquita y ponolita. Las ponolitas también son usadas en la manufactura del vidrio y si contienen cantidades significativas de zeolitas, pueden ser usadas como una puzolana (su comportamiento es mejor si se calcina). Las cenizas volcánicas son de grano muy fino (diámetro menor de 2 mm) y tienen propiedades puzolánicas. Las mejores son aquellas con una química de roca ácida.

Las condiciones climatológicas pueden hacer que la roca volcánica se convierta en arcilla. Las lateritas degradadas en ciertas localidades (ricas en aluminio) pueden conducir a la formación de bauxita.

Hay una subclasificación que indica dos tipos de estructura fundamental: un vidrio no alterado con burbujas redondas de “delgadas vacuolas” producidas por gases soltados por el magma durante la erupción, o materiales alterados los cuales tienen una estructura polifásica más compleja, algunas veces de grano fino. Existen generalmente tres tipos de componentes: un componente activo – usualmente una fase vítrea alterada, ópalo, tierra de diatomeas, fase amorfa y zeolitas-; un componente inerte –materiales bien cristalizados tales como el cuarzo, feldespato, piroxeno, augita y magnetita; y componentes nocivos tales como componentes orgánicos o arcillas.

El cascabillo de arroz y la paja de arroz tienen similares composiciones y no caen en la categoría de natural o artificial. Estos materiales consisten de 40-45% de celulosa, 25-30% de lignina, 15-20% de sílice y 8-15% de humedad. Cuando se calcinan a la temperatura correcta, se produce una ceniza de casi sílice pura.

La discusión anterior muestra que hay una variedad muy amplia de puzolanas; cada una es compleja y tiene muchos minerales diferentes. Para que tenga algún sentido este aparente caos, se ha intentado una clasificación de puzolanas de acuerdo con la mineralogía. El sistema de clasificación más desarrollado, define que el “Tipo activo” de una puzolana, a causa de actividad química, se debe a una a más de 5 sustancias, las cuales proveen la base para este sistema de clasificación.

Actividad tipo I: son vidrios volcánicos. Tobs riolíticas, pumicitas y tobas dacíticas se ha encontrado que son buenas, mientras que andesitas, basaltos y tobas basálticas son “casi insatisfactorias en calidad”. Tobs trácicas y tobas ponolíticas y cenizas requieren alteración hidrotermal para producir materiales zeolíticos y arcillosos, para ser considerados como satisfactorios. Lavas vidriosas con una alta proporción de vidrio ácido pueden ser satisfactorios, pero los costos de molienda pueden ser excesivos para propósitos prácticos.

La reactividad de los materiales tipo I se debe al vidrio volcánico, el cual tiene un índice refractivo entre 1.490 y 1.507. La constitución de todas las cenizas volcánicas y tobas puede resumirse en: vidrio volcánico, material no-reactivo, ópalo, arcillas o zeolitas que son también puzolánicos. Como una guía general, si ninguno de estos tipos está presente, entonces el vidrio presente debería de ser por lo menos 60% del total, para puzolanidad satisfactoria y controlarse la reacción álcali-agregado.

Actividad tipo II: consiste en tierra de diatomeas y hornsteno. La actividad es debida a la presencia de ópalo. Estas son las puzolanas más activas pero tienen la desventaja que demandan alta cantidad de agua, lo cual las hace imprácticas en algunas circunstancias. Por ejemplo, tales puzolanas pueden causar problemas de deformación excesiva si se usan en ambientes de secado y mojado. El área superficial de estos materiales normalmente está en el rango de 17,000-45,000 cm²/g. La resistencia a compresión a 90 días está entre 64 y 112 % de la muestra de control. Estas puzolanas mejoran con calcinaciones que estén en el rango entre 760 y 1,000 grados centígrados. Proporcionan buena resistencia a los sulfatos y son efectivas contra la reacción álcali-agregado, si se usa suficiente puzolana.

Actividad tipo III: comprende una amplia variedad de diferentes tipos de arcillas que deben ser calcinadas a temperaturas mayores de 540 grados centígrados, para tener suficiente reactividad y satisfactorios requerimientos de agua. También deben ser molidos.

Actividad tipo IV: son zeolitas tales como depósitos de tobas riolíticas. Su actividad es mejorada por calcinación. Algunas zeolitas pueden contener sodio y potasio y por esa razón no deben ser usadas con un agregado susceptible a reacción álcali-agregado.

Actividad tipo V: son óxidos hidratados de aluminio, por ejemplo bauxitas y desechos de bauxita.

Actividad tipo VI: Mielenz, Day y Quiñonez también definen esta actividad, la cual comprende materiales no reactivos tales como cuarzo cristalino, feldespatos, carbonatos, anfíboles, piroxenos, micas, etc. Bajo algunas circunstancias, la calcinación podría inducir puzolanidad en estos materiales, pero normalmente tales esfuerzos no parece que valgan la pena.

El *Bureau of Reclamation* desarrolló su clasificación acorde a la composición mineralógica, con referencia a los minerales activos de óxidos de sílice, aluminio y hierro en el material. Este sistema está basado en el trabajo de Mielenz.

1.1.3. Sistema de clasificación en base al comportamiento

Day y Quiñonez mencionan un sistema de clasificación conveniente basado en el comportamiento. Para esta clasificación se requiere de una base de datos muy grande. Un examen exhaustivo de 530 muestras de puzolanas

naturales americanas fue desarrollado por el *Bureau of Reclamation* de los Estados Unidos en 1969. Exámenes petrográficos y ensayos físicos con métodos de ASTM se realizaron y cada puzolana fue incluida en una clase, dependiendo de su respuesta física. El comportamiento está basado en cuatro ensayos: resistencia (actividad puzolánica), trabajabilidad (requerimientos de agua), serviciabilidad (contracción) y durabilidad (ataque álcali-agregado).

En general se puede determinar que de las 530 puzolanas naturales, 292 fueron eliminadas por la oficina después de un examen petrográfico preliminar. Muy pocas (14) de las puzolanas no requirieron preparación y solamente 18 tuvieron una calificación perfecta (clase 1 en cada uno de los requerimientos físicos mostrados).

Este tipo de clasificación parece ser más práctico que los otros. El criterio para cada clase podría variar de país a país, pero los elementos básicos indicados en el sistema (resistencia, trabajabilidad, deformación y durabilidad) son los elementos esenciales de una buena puzolanicidad.

Day, Hammond y Quiñónez, indican una clasificación más simplificada basada en la resistencia (actividad) de morteros curados por 8 días a 50 grados centígrados. Esta es la clasificación hindú, la cual presenta los siguientes límites de resistencia y su interpretación:

- Muy inactiva, si la resistencia es menor de 1.4 MPa
- Inactiva, si la resistencia está entre 1.4 y 2.8 MPa
- Pobremente activa, si la resistencia está entre 2.8 y 4.1 MPa
- Intermedia, si la resistencia está entre 4.2 y 5.5 MPa
- Activa, si la resistencia está entre 5.5 y 6.9 MPa
- Muy activa, si la resistencia es mayor de 6.9 MPa

1.2. Las puzolanas como aglomerantes

Las puzolanas forman parte del cemento de estructuras ancestrales en Egipto, Grecia y Roma. Hay también evidencia en cerámica, que fueron utilizadas en el período entre 3,000 y 1,500 antes de Cristo, en la elaboración de morteros de cal.

Los ingenieros antepasados encontraron que el uso de polvos finos de material natural o cerámica molida podían ser usados para hacer cemento, y consecuentemente edificaciones de muy alta calidad. Exámenes recientes han mostrado que el cemento encontrado en muchas partes de las Grandes Pirámides es de aproximadamente 4,500 años de edad y todavía está en buenas condiciones; lo cual puede ser contrastado con el cemento Portland moderno que ha sido usado para reparar monumentos egipcios ancestrales; este último material se ha agrietado y degradado en solamente 50 años.

El descubrimiento de los cementos cal-puzolana permitió cambios radicales en la construcción a causa del incremento de resistencia en los materiales; arcos, bóvedas, y también fue posible construir estructuras marinas con suficiente durabilidad. Los morteros cal-puzolana fueron utilizados como agentes repelentes al agua, para canales, duchas, tanques y acueductos.

Un concreto usado para hacer un tanque de almacenamiento de agua enterrado en la antigua ciudad de Camiros en la isla de Rhodes fue analizado y se encontró que contenía cemento hecho de cal y tierra volcánica. Este cemento en el concreto, hecho alrededor de 400-500 años antes de Cristo, contenía cerca del 20% de la masa del concreto.

En los concretos antiguos parece que mucha atención se dio a la graduación de los agregados y el concreto antiguo que fue ensayado tuvo una graduación muy cercana a la ideal que se reconoce actualmente para los concretos modernos.

Las adiciones minerales de alta finura pueden ayudar al mejoramiento de las cualidades del hormigón. Estos pueden ser efectos físicos tal como el incremento de la compacidad, o efectos físico-químicos como los nuevos productos de reacción formados durante la reacción puzolánica. En ambos casos el efecto final es similar, la porosidad del hormigón disminuye y la distribución y tamaño de los poros se hacen más pequeños. El uso de las puzolanas puede modificar las propiedades reológicas, mecánicas y la durabilidad del hormigón.

La función de la puzolana en los hormigones es aportar los finos que no tiene la dosificación, es decir, para aumentar la compacidad del hormigón. Como ya se ha dicho anteriormente, las puzolanas tienen casi ninguna propiedad hidráulica, pero al mezclarlas con el clínker del cemento (en su fabricación) se activa dicha propiedad. Como requisito en la utilización de puzolanas en hormigones se requiere que esta esté seca y pulverizada, para poder trabajar con una granulometría controlada.

Respecto de las resistencias mecánicas a compresión alcanzadas por las lechadas con puzolanas, son más elevadas de lo que cabría esperar, por el contenido en cemento de las mismas y por la elevada relación agua/cemento, demostrando el papel efectivo en el desarrollo de microestructuras resistentes activadas por la presencia de puzolanas.

La incorporación de puzolanas a las lechadas en niveles de sustitución elevados (30%), permite la reducción en el consumo de cemento, sin sacrificar las propiedades básicas del producto final.

La puzolana aplicada al concreto lo hace menos permeable y por tanto más durable, mejorando considerablemente las propiedades mecánicas de este. Además, propicia una disminución del contenido de cemento y produce el consiguiente ahorro de la mezcla.

La incorporación de puzolanas naturales mejora el comportamiento del cemento ante agentes agresivos y disminuye el calor de hidratación, debiéndose adoptar, por contra, precauciones especiales en el curado y en el hormigonado en tiempo frío.

En hormigones de resistencias normales, las puzolanas son añadidas para reducir los costos y mejorar los valores de resistencia y durabilidad de la masa endurecida. En tales casos, las puzolanas ayudan a mejorar la compacidad de los sólidos, pero el rol primario es proveer silicato cálcico hidratado adicional por medio de la reacción con el agua y con el hidróxido cálcico proveniente de la reacción del cemento portland. Esta reacción puzolánica es pequeña para la mayoría de las puzolanas utilizadas en altas proporciones, así, los beneficios son observados en el plazo de una semana a varias semanas después de mezcladas.

Algunas de estas puzolanas altamente reactivas (tales como la silica fume) son añadidas en pequeñas proporciones y ayudan a mejorar los valores de resistencias a edades tempranas, así como también la durabilidad a mayores edades.

En hormigones de alta y ultraaltas prestaciones, el fin primario es optimizar la distribución de tamaño de partículas, especialmente las finas. El uso de plastificantes de alto poder dispersante permite obtener mezclas con baja relación agua-aglomerante. El hormigón resultante tiene una alta resistencia, alta compactidad y por ende baja porosidad. En muchas de estas mezclas, sin embargo, la sustitución de cemento Portland es menos del 15%.

Conservadoramente, en hormigones con altos volúmenes de cenizas volantes, las adiciones minerales son mucho más altas que en los hormigones de cemento pórtland ordinario, y la relación agua/aglomerante mucho más baja (en el orden de 0,35). La resistencia a los 28 días está en el rango de los 60-90 MPa, muy lejos de los valores obtenidos en hormigones con el 100% de CPO.

Las adiciones minerales o puzolánicas ejercen una doble función en estos casos. Las finas partículas puzolánicas llenan los espacios vacíos entre los granos de cemento y entre el resto de los granos puzolánicos, mejorando la compactidad. Solo una pequeña parte de las adiciones puzolánicas, menor del 20% reacciona. La resistencia a la compresión, sin embargo, no se corresponde con el bajo nivel de hidratación alcanzado; es atribuida a la contribución de la interacción eléctrica entre las partículas más finas de las cenizas volantes.

La reacción puzolánica en muchas puzolanas es significativa después de los 7 días, cuando la mayoría de los productos de reacción del cemento ya se han formado, la concentración alcalina es considerable para romper los enlaces y facilitar la formación de productos de reacción del cemento.

En muchos casos y dependiendo de la reactividad de la puzolana, muchas de las reacciones finalizan en los primeros 60 días. Sin embargo, el uso de grandes volúmenes de adiciones puzolánicas incrementan el riesgo de la

autoneutralización debido al excesivo consumo de hidróxido de calcio durante la reacción puzolánica. Una caída significativa en el pH, puede causar la disolución de otros productos de reacción y la destrucción de la matriz cementicia.

Las propiedades del hormigón con grandes volúmenes de sustitución pueden ser mejoradas sustituyendo el cemento por aglomerante cal-puzolana, que con solo puzolanas. La presencia de cal adicional, reduce el riesgo de auto-neutralización, aun para grandes volúmenes de sustitución. La presencia de cal incrementa la concentración de iones Ca^{2+} , lo anterior se fundamenta en su contribución temprana en la formación de productos de reacción. La presencia de cal conduce al incremento de iones OH^- , cuya tarea es romper los enlaces silícicos en la puzolana, y con ello acelerar el comienzo de la reacción puzolánica. Los efectos de la cal pueden ser vistos en tres etapas diferentes:

- Durante el mezclado, las finas partículas de cal ocupan los espacios vacíos entre los granos de cemento y limitan el flujo de agua; de este modo incrementan la retención de agua en el hormigón fresco, actuando como un agente dispersante que previene la floculación e incrementa la plasticidad de la mezcla.
- A edades tempranas la cal ayuda al incremento de la compacidad del hormigón, dado que los granos de cal por ser tan finos, no han sido completamente disueltos y llenan los huecos entre los granos de cemento.
- A mayores edades, las finas láminas hexagonales de $2\ \mu\text{m}$ a $5\ \mu\text{m}$ ocupan los espacios entre los productos de reacción.

Martinez (2008) también enumera varias ventajas en el uso de puzolanas como adiciones:

- Reemplazan una buena porción del cemento Portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- Reducen el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- Evitan el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados para el concreto.
- Con el correr del tiempo, el concreto con puzolanas se hace menos permeable y más compacto que el elaborado usando cemento común.
- Para el medio ambiente, el uso de puzolanas reduce la emanación de dióxido de carbono.
- Aumento de la durabilidad de las estructuras de concreto.

1.3. Las puzolanas en el territorio de Guatemala

Dengo, en su obra de 1987 “Historia del desarrollo del conocimiento geológico de América Central” hace mención de la llegada de varios investigadores a la región centroamericana durante la segunda parte del siglo XIX con el propósito específico de estudiar aspectos de su geología. Fue el geólogo alemán Karl Von Seebach quien presentó la primera obra detallada y sistemática sobre los volcanes de América Central en 1892, basada en sus propias investigaciones, realizadas en los años de 1864 y 1865.

Sin menospreciar las descripciones hechas anteriormente por otros, la obra de Von Seebach es indudablemente la de mayor valor en cuanto a estudios vulcanológicos y también fue una de las primeras investigaciones de este tipo en el mundo.

Una obra que constituye una de las piedras fundamentales sobre la geología del norte de América Central, es la de los franceses A. Dollfus y E. de Montserrat, basada en sus investigaciones durante los años de 1863 y 1864 en El Salvador y Guatemala. Estos geólogos formaban parte de una Misión Científica enviada a México y América Central por el Emperador Napoleón III, quien aún antes de llegar al poder de Francia había escrito sobre las posibles rutas interoceánicas. La obra de Dollfus y de Montserrat, acompañada de un mapa geológico a colores, uno de los primeros de la época, sentó las bases de la estratigrafía de la región estudiada.

La figura que más destaca en la investigación de la geología centroamericana es indudablemente la del geólogo alemán Karl Sapper, quien llegó a Guatemala en 1888.

Las investigaciones de Sapper fueron sumamente extensas, no solo en el sentido geográfico sino también porque, además de hacer aportes a la geología, contribuyó a otras ramas científicas y al levantamiento de sus propios mapas topográficos.

En geología uno de sus mayores intereses fue el estudio de los volcanes, llegando años después a ser una autoridad mundial en ese campo. Sin embargo, sus investigaciones cubrieron todos los aspectos geológicos de Dollfus y de Montserrat, ampliaron los conocimientos estratigráficos de las rocas del Paleozoico y Mesozoico y varios de los nombres usados por él para las formaciones geológicas, siguen vigentes. Tales contribuciones estratigráficas en el norte de América Central las amplió mediante sus estudios en Belice, Yucatán y Chiapas.

Posteriormente, como resultado de sus viajes, generalmente a pie, por el centro y sur de la región, sus investigaciones vertidas en numerosas publicaciones, principalmente en alemán, cubrieron todos los países del Istmo y fueron resumidas en el libro *Mittelamerika* en 1937.

El Dr. F. Termer, en una publicación de 1956, también hizo numerosas investigaciones geográficas y etnológicas en Guatemala, en su biografía de Sapper, presenta un recuento detallado de los innumerables recorridos que hizo. En Guatemala, en 1883, el gobierno encargó a C. Manó, ingeniero belga, estudiar la República bajo el punto de vista mineralógico. Manó concentró sus investigaciones en el frente de montaña desde Huehuetenango hasta Izabal. Sus informes, presentados a la Secretaria de Fomento, fueron reproducidos en *Los Anales de la Sociedad de Geografía e Historia* en 1940.

Otro investigador que ha estudiado la geología de Guatemala durante varios años ha sido el geólogo y vulcanólogo Samuel B. Bonis. En su obra “Un resumen de la geología de Guatemala” describe a Guatemala como una continuación geológica de México y Norteamérica. Rocas paleozoicas y mesozoicas con rumbo sureste en el sur de México sufren en Guatemala un cambio de rumbo hacia el este y continúan hasta el mar Caribe, posiblemente emergen para formar parte del eje geológico de las Antillas mayores.

Bonis divide Guatemala en cuatro provincias principales: provincia volcánica de edad Terciaria a reciente que abarca la parte sur del país; la planicie costera del Pacífico que consiste en restos provenientes de la erosión de las sierras volcánicas; una cordillera que forma el núcleo geanticlinal del norte de Centroamérica, consistente en esquistos, granitos, serpentinas, y un cinturón plegado sedimentario hacia el norte, y la tierra baja del Petén, una cuenca sedimentaria de edad Cretácica que ocupa la región norte de la República.

Las rocas sedimentarias de la zona de pliegue y de la cuenca de El Petén, tienen juntas un espesor de más de 10 000 m, que incluye 3 000 metros de lutitas y calizas de edad pennsylvánica y pérmica, 1 000 metros de capas rojas de edad jurásica y cretácica, 3 000 metros de carbonatos cretácicos los cuales sufren un cambio lateral a una cuenca de evaporitas hacia el norte con un espesor posiblemente de más de 3 000 metros; y más de 1 000 metros de clásticos de edad terciaria inferior. Sedimentos de edad terciaria superior exceden 1 000 metros en espesor.

El cinturón volcánico formado por los volcanes cuaternarios de hasta 4000 m de altura, se incrementa estrepitosamente desde la plataforma costera. Bajo las edificaciones volcánicas y alrededor de ellos hacia el norte, se extiende el área de vulcanismo terciario que contienen depósitos llenos de pómez y grabens.

La provincia volcánica cubre el oeste, sur y sureste de Guatemala y se extiende a las otras repúblicas centroamericanas. La mayoría de la población está localizada en las tierras altas volcánicas y las ciudades más grandes están construidas sobre los depósitos de pómez que proporcionan la única región plana en esta área de topografía escabrosa. Algunos conos y domos de Guatemala todavía están activos, incluyendo Santiaguito, Pacaya, y Fuego. La imposición de los conos andesíticos del Cuaternario, junto con los lagos del altiplano, producen algunos de los paisajes más bellos del mundo.

La cordillera central de Guatemala es el corazón de la cadena montañosa en el noreste de Centro América. Consiste de una serie de montañas individuales las cuales están separadas a través de valles o grabens en la zona de falla. Grandes plataformas intramontañas también se presentan. Las partes sureste están formadas por esquistos cristalinos y plutonitas. Hacia el norte viene el cinturón de sedimentos de la parte superior del paleozoico a través de los cuales hacia el norte se forma la región de calizas del cretáceo, los que están por debajo de depósitos clásicos de la formación Todos Santos.

La sección transversal de la región explica que en el sur esta sección transversal revela el graben de la zona de fractura del río Motagua, el cual está lleno con sedimentos de la formación suvinal del terciario y por una cubierta de pómez. De acuerdo con McBirney, las pómez fueron producidas por la zona volcánica que está hacia el sur.

La estructura geológica y topografía de la frontera del Pacífico de América Central, está formada por una extensión grande de jóvenes y en muchos casos volcanes muy violentos. La cadena de volcanes tiene una extensión de casi 1 100 Km. Sin interrupción desde la frontera entre México y Guatemala hasta el volcán Turrialba en Costa Rica y de ahí con intervalos más grandes de 300 Km de volcanes individuales hasta Panamá. De acuerdo con Sapper, 101 volcanes de primer orden, y más o menos edificios volcánicos independientes, pertenecen a la cadena volcánica de Centro América. Su número se incrementa considerablemente cuando se toman en cuenta los volcanes más pequeños y extintos.

La lista preparada por Bohnenberger, indica el siguiente número de volcanes de varios tamaños y edades en los países de América Central: Guatemala 288, El Salvador 180, Honduras 18, Nicaragua 58, Costa Rica 30, Panamá 8.

Sapper hizo algunos descubrimientos acerca de la disposición especial de los volcanes y esos datos fueron tomados por Stoiber y Carr o Carr y Stoiber quienes los interpretaron con actividad sísmica y tectónica de placas. De acuerdo con estos autores, los volcanes de Centro América no están dispuestos en una cadena interrumpida (Sapper hace referencia a una fisura longitudinal), sin embargo están distribuidos en un cierto número de cadenas cortas separadas, las cuales están en relación una con otra.

Stoiber y Carr ven esto como una evidencia de segmentos de placas, con ángulos diferentes de inclinación hacia la zona de subducción, los cuales están en relación uno con otro en la corteza por una falla transversal.

Distinguieron al principio 7 y después 8 segmentos, en cuyas descripciones aparece el primero que va de la zona occidental de Guatemala hasta la zona central e involucra fundamentalmente los volcanes de Santa María (llamado *Gagxanul* por los k'iche's), Santiaguito, San Pedro (llamado *Choyjuyub* por los cakchiqueles), Atitlán, Fuego (llamado *Chi'gag* por los cakchiqueles), Acatenango, Agua (llamado Hunapú por los cakchiqueles) y Pacaya.

El segundo segmento abarca la frontera del centro de Guatemala hasta el oriente e involucra los volcanes de Jumay, Tecuamburro, Las Flores (también llamado Amayo), Ipala, Chiquimula y Moyuta.

Capas de pómez riódasítica, las cuales fueron depositadas algunas veces como tefras y algunas veces en forma de avalanchas y que en algunos casos fueron redistribuidas por acción fluvial, son características del altiplano volcánico de Guatemala, y las plataformas intramontañas que tiene. Harold Williams en 1964, proporcionó la primera descripción general de la distribución y formación de estas rocas piroclásticas, la mayoría de las cuales él reconoció que había estado siendo traída de otro lado, ya que su origen no podría ser satisfactoriamente identificado. Inicialmente dataciones de carbono 14 embebido en las rocas dieron edades de por lo menos 16 000 años. Una datación realizada después presentó edades de 31 000 o 35 000 años.

Sobre la base de características megascópicas, la proporción de fenocristales básicos, los estudios detallados por Koch y McLean distinguieron entre 26 capas de tefras del pleistoceno, 4 tobas de flujos de cenizas, 4 capas de sedimentos fluviolacustres y un sinfín de suelos enterrados. Se encontró que las tefras se originaron de los volcanes de Pacaya, Agua, Acatenango/Fuego, la región del lago de Atitlán y la laguna de Ayarza.

Los espesores de las secuencias fluctúan entre más o menos 30 metros en el altiplano y en las vecindades de los volcanes hasta 100 metros en la base. Las capas de tefras individuales cubren de 600 a 7500 Km² y la toba incandescente más grande se extiende en por lo menos 16000 Km². Se extiende en la región de Cobán y Huehuetenango. Las tefras fueron dispersadas hacia el norte de acuerdo con la dirección prevaleciente del viento.

La edad de las erupciones ha sido determinada por recientes dataciones de carbono 14 sobre carbón y dataciones de K-Ar sobre hornblendas y biotitas, los cuales mostraron una edad entre 4 000 y 1 840 millones de años. Koch y McLean indicaron que el más reciente flujo de cenizas tiene una edad de 40000 años y que el intervalo de recurrencia de esas erupciones no se conoce. Una repetición de este evento eruptivo es entonces enteramente posible en la actualidad y tendría consecuencias catastróficas.

Las cenizas y las pómez de los volcanes de América Central han sido detectados en operaciones de perforaciones en el fondo del mar en el Océano Pacífico y las ocurrencias más grandes cubren áreas de 300,000 y 400,000 Km². Las capas de ceniza en su mayoría, si no todas según él, no son más antiguas que 300,000 años.

El Pacaya es un complejo de edificios volcánicos severamente fallados al sur de la Ciudad de Guatemala y se extiende en el área de norte a sur del graben de Guatemala. Domos de riolita y andesita, volcanes de estrato andesítico, conos basálticos y espesas capas de pómez dacítica, están presentes en su estructura. Un periodo de actividad violenta con producción de lavas andesíticas y basálticas se inició en 1961. En 1962 un nuevo cráter se formó y su erupción fue del tipo estromboniano, al principio violento, más tarde moderado, y continúa a tal nivel que está presente en nuestros días.

La base del lago de Amatitlán, el cual se localiza al norte del volcán Pacaya, debe ser interpretada como una depresión vulcano-tectónica, la cual está probablemente relacionada con la estructura del edificio del Pacaya.

El vulcanismo cuaternario del sur-este de Guatemala difiere notablemente del altiplano. Los grandes volcanes extinguidos consisten principalmente de fenobasaltos, son frecuentes pequeños conos de escoria basáltica, la pómez es rara. En su lugar se encuentran flujos y domos de obsidiana riolítica, la cual es escasa en el altiplano de Guatemala. Los centros de erupción están unidos a fallas con tendencia de norte a sur, en contraste al arreglo usual de los volcanes a través de líneas oeste noroeste / este sur-este. La asociación de productos basálticos y riolíticos es única en Centro América y está reconocida como una etapa de erupción con extrema diferenciación fraccional de cristalización en cámaras de magma basáltica.

1.4. Las puzolanas en la región occidente de Guatemala

La información que aparece en este inciso sobre las puzolanas en la región occidente de Guatemala fue extraída del trabajo de Arriaga, publicado en 1993 titulado “Evaluación geológica de bancos de puzolanas y calizas en el occidente de Guatemala”; se hará una descripción de lo que corresponde a las rocas del cenozoico con la unidad piroclástica.

1.4.1. Rocas Cenozoicas

Koch y McLean desarrollaron su tesis doctoral en la investigación del material piroclástico, dividiendo la pómez estudiada en dos grandes unidades: el de abajo Grupo Sumpango y el de arriba Grupo San Cristóbal, definiendo en cada uno una serie de letras para los distintos flujos y tefras estudiadas.

El trabajo de Arrivillaga se centra en el estudio de lo que los autores antes mencionados llamaron "diamictón H" y, Hanh en 1976, denominó Los Chocoyos, aunque en los siguientes párrafos se nombrará a estas unidades como originalmente las llamaron Koch y McLean: Diamictón H.

Este material se encuentra formando grandes extensiones de terrazas, y consecuentemente, grandes cañones. Su espesor oscila alrededor de 200 metros aproximadamente; esta unidad tiene una matriz de blanca a gris conteniendo una gran cantidad variable de fragmentos en un rango del 1 al 60%.

El promedio de los fragmentos líticos no son uniformes y están en una proporción 10:1. Los fragmentos líticos consisten principalmente de granos oscuros volcánicos, principalmente andesíticos teniendo en algunos casos pequeños porcentajes de fragmentos intrusivos de composición granodiorita, observación macroscópica. Los fragmentos generalmente son de subredondeados a angulares con un promedio de tamaño de 1 - 3 centímetros. En muchos casos la unidad contiene más pómez blanco que fragmentos líticos y las pómez son generalmente de gran tamaño aproximadamente entre 2 - 5 cm, con piezas individuales arriba de los 50 cm.

Esta unidad se interpreta como una secuencia de flujos de pómez que fue extruida cerca del origen. La naturaleza de esos depósitos son caóticos, implicando pequeños tiempos de ordenamiento, aunque la dirección de los líticos no necesariamente dará la forma y origen de la formación. En algunos casos, los patrones de estudio sobre el ordenamiento de tamaño pueden dirigir en cierta forma los horizontes.

Se puede decir que tiene una cobertura de 16 000 km², haciendo con esto que sea la más extendida en Guatemala. Se caracteriza y es fácil de reconocer en campo por sus fragmentos plutónicos y la existencia en su parte superior de un rosado salmón, posiblemente como resultado de la oxidación de la Unidad en el momento de su enfriamiento. Basados en su mineralogía y en sus condiciones macroscópicas, Koch y McLean determinaron que el origen de esta Unidad era posiblemente en las cercanías del lago de Atitlán; igual respuesta obtuvo Hanh respecto al origen de la unidad descrita.

En el recorrido realizado en 1993, Arrivillaga observó otros tipos de pómez, y según su criterio, dentro de todas se pueden detallar a tres unidades de tefras, que son fácilmente identificables en todas las áreas mapeadas. Son unidades que contienen fragmentos blancos, bien ordenados y granulares en un orden de centímetros de diámetro. Esas unidades manifiestan total carencia de material fino y de fragmentos líticos siendo su fragmentación de buena a relativamente buena. Su mineralogía consiste en cantidades de cuarzo, biotita y en algunas ocasiones muscovita.

La más joven de esas tefras, consideración hecha por su posición estratigráfica, tiene entre 50 y 100 cm de espesor, con fragmentos de 1 - 40 mm de diámetro. Son unidades bien ordenadas de grano fino de color blanco a ceniza grisáceo, arriba de 150 cm de espesor.

Incluyen una capa de ceniza la cual pudo haberse producido después de una explosión la cual sería de pómez de lapilli acrecional.

La segunda separada por un paleosuelo de color café, con un espesor de 10 metros y caracterizado por una capa baja de cinders negro. El tamaño de grano de la unidad es de 1 - 30 mm, con un 1% de fragmentos y de tamaño de

80 - 100 mm de diámetro. Estas unidades también contienen alrededor de 1% de fragmentos líticos, de 10 mm a menos de diámetro.

La última unidad de tefras que Arrivillaga considera es la más antigua, subyace a los flujos que Hanh denominó "Los Chocoyos" y Kock y McLean "Diamicton H". Es una unidad bien compacta y su distribución es la mejor de las 3; excelente ordenamiento con un rango de 1 - 10 mm solamente. Tiene 1 metro de espesor. Arrivillaga supone que corresponde a la unidad que Koch y McLean en 1970 llamaron H.

La separación entre capa y capa está bien marcada por paleosuelos que oscilan entre café y café rojizo, su espesor va de 10 cm a 2 m máximo. Estas capas cubren un gran porcentaje de la región de Huehuetenango, son del tipo de valle plano. La ceniza esparcida en la parte sur tiene espesores que varían aproximadamente de 60 a 80 m.

Mucha de esta ceniza es de color blanco a crema. Pero también se localiza la unidad Los Chocoyos o Diamicton H, que como se mencionó, es la que más cobertura tiene. La distribución es una característica de esos depósitos y viene indicado por fragmentos de pómez en un rango que va desde ceniza y lapilli hasta bloques de 30 cm de diámetro.

Williams en 1960 sugirió que las pómez depositadas en Chiantla son originadas por grandes avalanchas ardientes. La forma de su deposición indica su origen de avalanchas.

1.4.2. Sedimentos volcánicos

Varios tipos de sedimentos volcánicos que existen en el área estudiada por Arrivillaga, se encuentran encima de la unidad de Diamicton H o Los Chocoyos, con espesores entre 10 metros aproximadamente; consisten en una alternancia de capas finas y anchas, y oscilan entre 10 cm de espesor y fragmentos de 70 cm de pómez con un diámetro de 1 cm y líticos alrededor de 1.5 cm de diámetro. Su origen puede ser un retrabajamiento de la unidad de Los Chocoyos.

Se localizaron capas de diatomeas entre Godínez y los Robles, en el departamento de Sololá, de espesor de 10 metros, supuestamente de origen lacustre, aunque bien pueden ser el último episodio de una erupción, de acuerdo con Viramonte. Las capas buzan 35 grados al noreste.

En Huehuetenango, se pudo observar que existen tobas con espesores de 50 metros aproximadamente; por la posición y realizando fotogeología se puede decir que la extensión puede ser de alrededor de 350 km².

Existen materiales volcánicos de gran variedad de colores, que van desde gris, café a rojizos los cuales serán de un color a otro debido a su génesis mineralógico, con un espesor aproximado de 240 m.

Arrivillaga ubica los bancos antes descritos en los siguientes departamentos: Chimaltenango en Chimaltenango, Chiantla en Huehuetenango, Cabricán, Huitan, Quetzaltenango y Salcajá en Quetzaltenango, Chichicastenango y Santa Cruz del Quiché en Quiche, Sololá y zonas aledañas, Godínez y Los Robles en Sololá y San Cristóbal Totonicapán y San Francisco El Alto en Totonicapán.

La mayoría de los bancos para esta unidad se puede decir que contienen entre 90 y 95% de ceniza. Las otras unidades analizadas, podrán después de realizar cierto tipo de tratamiento mecánico, llegar a tener la fineza requerida.

2. METODOLOGÍA

2.1. Localización de bancos potenciales

Tomando como base la información sobre estudios geológicos de la región centroamericana encontrada, de la cual se hizo una recopilación en el capítulo anterior de este trabajo, se determinó un área preliminar donde se pudieron encontrar bancos potenciales para la extracción de las muestras de puzolana.

Para la ubicación de estas áreas se utilizó el mapa geológico de Guatemala, el mapa de carreteras de Guatemala y la información contenida en el documento publicado en 1967 por la *Geological Society of America* titulado “*Excursion Guide Book For Guatemala*” donde se describe una excursión realizada por O. Bohnengerger, S. Bonis, G. Dengo, J. Godoy y O. Salazar. El recorrido fue realizado por la carretera Panamericana (CA-1) de Huehuetenango hacia el lago de Atitlán.

En dicho documento los exploradores antes mencionados describen depósitos de pómez suelta, no clasificada ni estratificada, característica de muchas cuencas de pómez cuaternaria en Guatemala. Este tipo de material se encuentra en varios puntos durante dicho recorrido y fue una guía para saber dónde empezar la extracción de muestras en esta investigación.

Se determinó la mejor ruta para realizar un recorrido preliminar y se identificaron bancos potenciales para la extracción del material en estudio, utilizando el mapa de carreteras de Guatemala. Para facilitar la extracción de las muestras se buscaron bancos cercanos a la carretera.

Partiendo del km 203 de la carretera CA-1, se procedió a identificar los lugares que se consideraron importantes para el estudio.

Posteriormente a un análisis tanto de la bibliografía como a una nueva revisión de mapas geológicos de la región y de una discusión de lo que se observó durante el recorrido preliminar para la identificación de bancos, se procedió a realizar un segundo recorrido, esta vez para extracción de muestras del material en estudio. De los bancos que se visitaron en el primer recorrido se redujo el número a 7, los que se consideraron más apropiados, y se identificó cada uno con las coordenadas geográficas, altitud y posición, respecto del kilometraje de la carretera principal.

2.2. Muestreo

El muestreo se realizó utilizando herramienta apropiada para la extracción, piochas y palas se usaron para desprender el material del banco evitando tomar las muestras del material que se encontraba en el suelo y tratando de no contaminar con materia orgánica u otro material ajeno al que se estudió. Las distintas muestras se depositaron en bolsas previamente identificadas con el nombre del banco y fueron trasladadas al laboratorio. Aproximadamente, se extrajo 30 kilogramos de material de cada banco.

2.3. Preparación de muestras

Ya obtenidas las 9 muestras de los 7 bancos, se prepararon previamente a los ensayos (trituration, secado al sol, secado al horno), como se describe en los siguientes numerales.

2.3.1. Trituración

Debido a que dos de las muestras extraídas contenían gruesos de considerable tamaño, se procedió a una trituración manual hasta disminuir su tamaño para que esta pasara por el tamiz de $\frac{1}{4}$ ".

2.3.2. Secado al sol

Previo al secado en horno se realizó un secado al sol para extraer la humedad del material de forma natural. Se colocó la muestra sobre carpetas plásticas y se extendió hasta dejar una capa delgada del material para que se secase de una mejor manera y de forma más rápida.

2.3.3. Secado al horno

Para obtener el valor de humedad de la muestra después de secado al sol, se introdujeron al horno 15 kilogramos de cada una por 24 horas, a una temperatura de 110 °C, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D2216-10 "*Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*".

2.3.4. Molienda

Para lograr una mejor puzolanicidad en las muestras extraídas se procedió a molerlas en un molino de bolas marca Patterson con una capacidad de aproximada de 0.1 m³. Las bolas utilizadas fueron de dos diámetros distintos, uno de 31.5 mm y otro más pequeño de 24.5 mm. La molienda se realizó durante 3 horas, tomando una muestra aproximadamente de 200 gramos para cada hora de molienda.

2.4. Procedimientos de ensayo

Se realizaron los ensayos siguiendo las indicaciones descritas en las normas ASTM correspondientes. A continuación se presenta una traducción libre de las normas tomando en cuenta solamente la parte que describe el procedimiento y el cálculo.

2.4.1. Determinación en laboratorio del contenido de humedad en las muestras del material en estudio

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM D2216-10 *Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*.

2.4.1.1. Procedimiento

Se determinó y registró la masa del recipiente de la muestra limpio y seco; luego se seleccionaron muestras representativas de ensayo. Después de colocar la muestra húmeda en el contenedor, se determinó la masa del recipiente y el material húmedo con la balanza y se anotó este valor. Se colocó el recipiente con material húmedo en el horno de secado y se secó el material hasta masa constante. El horno de secado se mantuvo a una temperatura de 110 ± 5 °C. El tiempo necesario para obtener una masa constante puede variar dependiendo del tipo de material, el tamaño de la muestra, el tipo de horno y de la capacidad, entre otros factores.

Después que el material se secó hasta masa constante, se retiró el recipiente del horno. Se dejó que el material y el recipiente se enfriaran a temperatura ambiente o hasta que el recipiente se pudiera manejar

cómodamente con las manos y la operación de la balanza no se viera afectado por las corrientes de convección y/o se calentara. Se determinó el peso del recipiente y el material secado al horno con la misma balanza utilizada al principio. Se anotó este valor.

2.4.1.2. Cálculo

El contenido de agua del material se calculó de la siguiente manera:

$$W = [(M_{cws} - M_{cs}) / (M_{cs} - M_c)] \times 100 = M_w / M_s \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

W = contenido de agua en %.

M_{cws} = masa del recipiente y la muestra húmeda en g.

M_{cs} = masa del recipiente y la muestra secada al horno en g.

M_c = masa del recipiente en g.

M_w = masa de agua ($M_w = M_{cws} - M_{cws}$) en g.

M_s = masa de las partículas sólidas ($M_s = M_{cws} - M_c$) en g.

2.4.2. Tamiz de ¼"

Solamente las muestras que presentaban algunos gruesos en su contenido fueron pasadas por el tamiz de ¼". Las demás muestras presentaron únicamente finos, por lo que no se tamizaron ya que el dato no sería representativo.

El cálculo se realizó utilizando la ecuación descrita a continuación:

$$\% \text{ que pasa} = \frac{W_m - W_r}{W_m} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

W_m = Peso de la muestra a ensayar.

W_r = Peso de la muestra retenida en el tamiz.

2.4.3. Tamiz no. 30 y no. 200

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C110-11 *Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone*.

Nota: esta norma describe el procedimiento para realizar el ensayo con los tamices No. 30 y No. 200. La norma es para realizar la prueba a la cal viva, cal hidratada y piedra caliza, pero de la misma forma se le realizaron las pruebas a las muestras de puzolanas.

2.4.3.1. Procedimiento

Se seleccionó una muestra de 100 g del material en estudio tal como se encontró, y fue colocada en el tamiz de 600 micrómetros (No. 30), que se ubicó por encima del de 75 micrómetros (No. 200). Se lavó el material a través de los tamices por medio de una corriente de agua de la boquilla conectada a un tubo, después de ajustar la presión del agua de 69 ± 1.7 kPa (10 ± 0.25 psi). Luego se lavó cuidadosamente la muestra a través de los tamices, sin permitir que ninguna salpicadura cayera sobre los bordes de los mismos.

Después de que la muestra se lavó a través del tamiz superior, se separaron los dos tamices y se continuó lavando por el tamiz de 75 micrómetros (No. 200) hasta que el agua que pasara a través del tamiz fuera clara, es decir, que las partículas no pudieran ser vistas en un vaso que contuviera el agua de

enjuague; pero en ningún caso se continuó con el lavado por más de 30 minutos. Se tuvo el cuidado de no dejar que el agua se acumulara en el tamiz de 75 micrómetros (No. 200), ya que las aberturas se tapan y la operación no se podría completar en 30 minutos.

2.4.3.2. Cálculo

Se calculó el porcentaje de residuo retenido en cada tamiz, basado en el peso original de la muestra. El peso del material retenido en el tamiz de 600 micrómetros (No. 30) se sumó al peso del material retenido en el tamiz de 75 micrómetros (No. 200), para obtener el peso correcto del material retenido en este tamiz.

2.4.4. Tamiz No. 325

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C430-08 *Standard test method for fineness of hydraulic cement by the 45-mm (no. 325) sieve*.

2.4.4.1. Procedimiento

Fue colocado 1 g del material en estudio limpio y seco en el tamiz No. 325, se humedeció toda la muestra suavemente con un atomizador de agua, se removió el tamiz por debajo del aspersor y se ajustó la presión del aspersor de 69 ± 4 kPa (10 ± 0.5 psi). Se regresó el tamiz a su posición bajo el aspersor y se lavó por 1 minuto moviendo el tamiz circularmente en un plano horizontal a una velocidad de una revolución por segundo en el aspersor. La parte baja del aspersor quedó sobre la parte alta del marco del tamiz aproximadamente 12 mm (0.05 in).

Se secó el tamiz y el residuo de la muestra en un horno (Nota: tener cuidado de no calentar demasiado el tamiz para no ablandar la soldadura), se colocó el tamiz a manera de que el aire pudiera pasar libremente por debajo de él. Se enfrió el tamiz; y con una brocha se limpiaron los residuos del mismo, y se pesó en una balanza con capacidad analítica de 0.005 g.

2.4.4.2. Cálculo

Se calculó la fineza del cemento con una aproximación de 0.1% como sigue:

$$R_c = R_s * (100 + C) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$F = 100 - R_c \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

F = finura del cemento expresada como un porcentaje corregido que pasa de 45 micras (tamiz No. 325)

R_c = residuo corregido, %

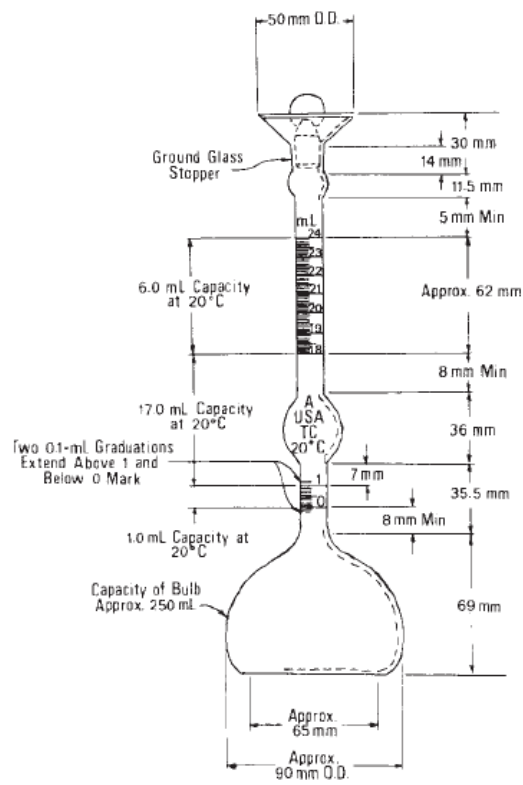
R_s = residuo de la muestra retenida en el de 45 micras (tamiz No. 325), g

C = factor de corrección del tamiz.

2.4.5. Densidad del cemento hidráulico

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C 188-09 *Standard test method for density of hydraulic cement*.

Figura 1. Dimensiones del balón de Le Chatelier



Fuente: ASTM. Norma 188-09.

2.4.5.1. Procedimiento

La densidad de la muestra se determinó tal y como se encontró. Se llenó el matraz (se utilizó una almohadilla de goma sobre la mesa durante el llenado y rodado del frasco.) con keroseno libre de agua, teniendo una densidad más grande que 0.73 g/ml a 23 ± 2 °C, a un punto en el cuello situado entre 0 y la marca de 1 ml. Si era necesario, se secaba el interior del frasco por encima del nivel del líquido, después de verter. Se anotó la primera lectura después de que el matraz estuvo inmerso en el baño de agua (Antes de que la muestra fuera agregada al matraz, se sostuvo el cuello del matraz con una pinza de bureta, esto ayudó en el sostenimiento del matraz en una posición firme y recta en el baño de agua).

Se introdujo una cantidad de material (unos 64 g), pesados con precisión de 0.05 g, en pequeños incrementos a la misma temperatura que el líquido. Durante este proceso se tuvo el cuidado de evitar salpicaduras y ver que la muestra no se adhiriera al interior del frasco por encima del líquido. Un aparato de vibración se utilizó para acelerar la introducción de la muestra en el frasco y para evitar que el cemento se pegara en el cuello. Después de que toda la muestra se introdujo, se colocó el tapón en el frasco y se rodó este en una posición inclinada sobre una almohadilla de goma sobre la mesa, con el fin de liberar el aire de la muestra hasta que no subieron burbujas a la superficie del líquido.

Se tomó una lectura final después de que el frasco fue inmerso en el baño de agua. El matraz fue sumergido en el baño de agua a temperatura constante por períodos de tiempo suficientes para evitar que la temperatura del mismo tuviera variaciones superiores a 0.2 °C entre la lectura inicial y la final.

2.4.5.2. Cálculo

La diferencia entre los valores de la primera y segunda lectura representa el volumen del líquido desplazado por la masa de la muestra utilizada en la prueba.

Se calculó la densidad del cemento, ρ , de la siguiente manera:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \frac{\text{masa del cemento (g)}}{\text{Volumen desplazado (cm}^3)} \quad (\text{Ec. 5})$$

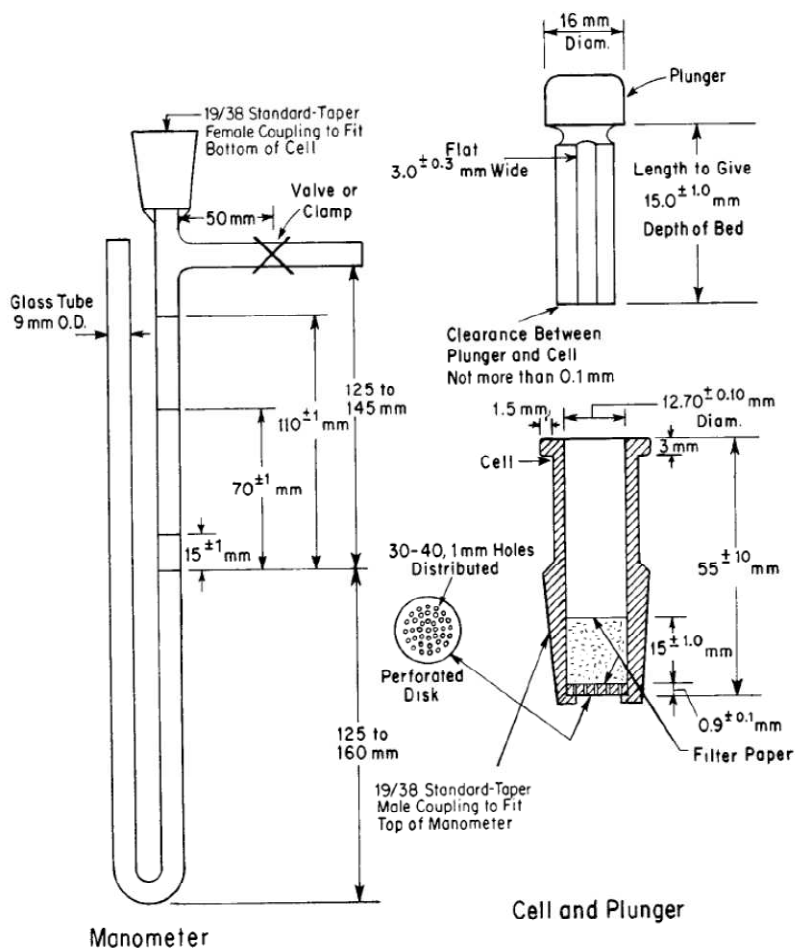
Nota 1: el volumen desplazado en milímetros es numéricamente equivalente al volumen desplazado en centímetros cúbicos.

Nota 2: la densidad en megagramos por metro cúbico (mg/m^3) es numéricamente equivalente a los gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Se calculó la densidad de la muestra, ρ , con tres decimales y se redondearon con precisión de 0.01 mg/m^3 .

2.4.6. Finura del cemento hidráulico por el aparato de permeabilidad al aire

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C 204-11 *Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus*.

Figura 2. **Aparato de permeabilidad al aire**



Fuente: ASTM. Norma C 204-11.

2.4.6.1. **Calibración del aparato**

La calibración del aparato de permeabilidad al aire se realizó con los materiales de referencia estándar NIST No. 114. La muestra estuvo a temperatura ambiente durante la prueba.

El volumen de la masa de la cama compactada de polvo se determinó por el método de desplazamiento de mercurio de la siguiente manera:

Se colocaron dos discos de papel filtro en la celda de permeabilidad, presionando los bordes, con una varilla de diámetro ligeramente más pequeño que el de la celda, hasta que los discos de filtro quedaron planos sobre el disco de metal perforado, y luego se llenó la celda con el mercurio, utilizando pinzas para el manejo de la celda.

Se niveló el mercurio con la parte superior de la celda presionando ligeramente una placa de vidrio pequeño contra la superficie del mismo, hasta que el vidrio estuvo a ras de dicha superficie y del borde de la celda, asegurándose de que no había burbuja o vacío entre la superficie del mercurio y la placa de vidrio. Posteriormente, se eliminó el mercurio de la celda y se midió y registró su masa. Se eliminó uno de los discos del filtro de la célula. Con una cantidad de prueba de 2.8 g de cemento (nota 3) se comprimió el cemento (nota 4), con un disco de filtro arriba y uno abajo de la muestra.

En el espacio sin llenar, en la parte superior de la celda, se añadió el mercurio, se eliminó el aire atrapado, y se niveló la parte superior como antes. Nuevamente se eliminó el mercurio de la célula y se midió y registró su masa.

Para el cálculo del volumen total ocupado por el cemento con una precisión de 0.005 cm³ se aplicó la siguiente fórmula:

$$V = \frac{(WA - WB)}{D} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

V = volumen de la masa de cemento, cm^3

W_A = gramos de mercurio necesarios para rellenar la celda, sin el cemento en la celda

W_B = gramos de mercurio necesarios para cubrir la parte de la celda no ocupada por la cama preparada de cemento en la celda

D = densidad del mercurio a la temperatura de la prueba, mg/m^3

Se hicieron dos determinaciones de volumen de la masa de cemento, con compactación para cada determinación. El valor de volumen de la masa utilizada para los cálculos posteriores fue el promedio de dos valores dentro de $\pm 0.005 \text{ cm}^3$. Se tomó en cuenta la temperatura en las proximidades de la celda y se anotó al principio y al final de la determinación.

Nota 3: no es necesario utilizar el estándar de la muestra para la determinación del volumen.

Nota 4: la cama preparada de cemento debe ser firme. Si está muy floja o si el cemento no puede ser comprimido hasta el volumen deseado, se debe ajustar la cantidad de prueba de cemento utilizado.

Para la preparación de la muestra se introdujo el contenido de una cápsula de la muestra de cemento estándar en un frasco, aproximadamente 120 cm^3 (4 oz) y se agitó enérgicamente durante 2 minutos para esponjar el cemento y romper los grumos o aglomerados. Se dejó el frasco de pie para distribuir suavemente a lo largo de la muestra de la fracción fina que se instaló en la superficie después del esponjamiento. Se dejó el frasco de pie sin abrir durante 2 minutos, luego se retiró la tapa y se agitó suavemente para distribuir a lo largo

de la muestra, la fracción fina que asentó en la superficie después del esponjamiento.

La masa de la muestra estándar utilizada para la prueba de calibración que se requirió para producir una capa de cemento con una porosidad de 0.500 ± 0.005 ; se calculó con la siguiente ecuación:

$$W = \rho V(1-\varepsilon) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

W = gramos de muestra necesaria

ρ = densidad de la muestra (para el cemento Portland se utiliza un valor de 3.15 Mg/m^3)

V = volumen total de la cama de cemento, cm^3 , según lo determinado de acuerdo con el inciso "b" de este numeral

ε = porosidad deseada de la cama de cemento (0.500 ± 0.005) (Nota 5)

Nota 5: la porosidad es la relación entre el volumen de huecos en una cama de cemento con el volumen total o la mayor parte de la cama.

Para la preparación de la cama de cemento se colocó el disco perforado en el borde de la celda de permeabilidad, con la marca hacia abajo. Se utilizó un disco de papel de filtro sobre el disco de metal y se presionó el borde hacia abajo con una varilla de diámetro ligeramente más pequeño que el de la celda. Se midió la masa con una precisión de 0.001 g de la cantidad de cemento determinado anteriormente y fue colocado en la celda. Se dieron ligeros toques al lado de la celda con el fin de nivelar las partículas de cemento. Con un disco de papel de filtro en la parte superior del cemento se

comprimió el cemento con el émbolo hasta que el cuello del mismo estuvo en contacto con la parte superior de la celda.

Se retiró lentamente el émbolo a una corta distancia, se giró alrededor de 90°, se presionó nuevamente y luego se retiró lentamente. El uso de nuevos discos de papel filtro se requirió para cada determinación.

2.4.6.2. La prueba de permeabilidad

Se colocó la celda de permeabilidad en el tubo del manómetro, asegurándose de obtener una conexión hermética aplicando un poco de grasa en la llave de paso, teniendo cuidado de no alterar la cama preparada de cemento. (Nota 6).

El aire, en uno de los brazos del manómetro de tubo en U se evacuó poco a poco hasta que el líquido alcanzó la marca superior, y luego se cerró la válvula herméticamente. El cronómetro se activó cuando la parte inferior del menisco del líquido del manómetro llegó a la segunda marca (junto a la parte superior) y se detuvo cuando la parte inferior del menisco del líquido llegó a la tercera marca (junto a la parte inferior). Se anotó el intervalo de tiempo medido en segundos, así como la temperatura de la prueba en grados Celsius.

En la calibración del instrumento, se hicieron por lo menos tres determinaciones del tiempo de flujo en cada una de las tres camas por separado de la muestra patrón (Nota 7). La calibración fue realizada por el mismo operador quien hizo la determinación de finura.

Nota 6: la eficacia de la conexión puede ser determinada uniendo la celda al manómetro, tapando parcialmente la evacuación del brazo del manómetro; a continuación, cerrar la válvula. Cualquier caída continua de la presión indica una fuga en el sistema.

Nota 7: la muestra puede ser reutilizada para la elaboración del banco de pruebas, siempre que se mantenga seca y todas las pruebas se realicen dentro de las 4 horas a partir de la apertura de la muestra.

2.4.6.3. Procedimiento

La muestra del material estuvo a la temperatura de la sala donde fue probada. El peso de la muestra utilizada para la prueba fue igual a la utilizada en la prueba de calibración con la muestra estándar. La muestra puede ser distinta en las siguientes excepciones: cuando se determina la finura del tipo III u otros tipos de cemento Portland finamente molidos, cuyo volumen de esta masa es tan grande que la presión ordinaria del pulgar no entrará en contacto con el cuello del émbolo; entonces el peso de la muestra deberá ser el requerido para producir una cama de muestra teniendo una porosidad de 0.530 ± 0.005 .

Cuando se determinó la finura de materiales que no fueron de cemento Portland, el requerimiento de porosidad no fue tomado en cuenta, la masa de la muestra fue ajustada y firme, una cama dura se produjo en el proceso de compactación. Sin embargo, en ningún caso, la presión del pulgar fue usada para asegurar la propiedad de la cama; tal presión del pulgar no se usó para que el émbolo rebotara de la celda superior cuando la presión fue removida.

Para la preparación de la cama de prueba de la muestra se hizo de la misma forma descrita en la calibración del aparato, al igual que la prueba de permeabilidad, excepto que en la determinación del tiempo de flujo se hizo en cada cama.

2.4.6.4. Cálculo

Los valores de la superficie específica se calcularon de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} \quad (3)$$

$$S = \frac{S_s \sqrt{\eta_s} \sqrt{T}}{\sqrt{T_s} \sqrt{\eta}} \quad (4)$$

$$S = \frac{S_s (b - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s} (b - \epsilon)} \quad (5)$$

$$S = \frac{S_s (b - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{\eta} \sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s} \sqrt{\eta} (b - \epsilon)} \quad (6)$$

$$S = \frac{S_s \rho_s (b_s - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}} \quad (7)$$

$$S = \frac{S_s \rho_s (b_s - \epsilon_s) \sqrt{\eta_s} \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s} \sqrt{\eta}} \quad (8)$$

Donde:

S = superficie específica de la muestra de prueba, m^2/kg .

Ss = superficie específica de la muestra estándar utilizada en la calibración del aparato, m^2/kg (Nota 8).

T = intervalo del tiempo medido, en segundos, de la caída del manómetro para la prueba de la muestra (Nota 9).

Ts = intervalo del tiempo medido, en segundos, de la caída del manómetro para la prueba estándar utilizada en la calibración del aparato. (Nota 9).

h = viscosidad del aire, segundos micropascal ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$), en la temperatura de la prueba en la prueba de la muestra (Nota 9).

hs = viscosidad del aire, segundos micropascal ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$), en la temperatura de la prueba de la muestra estándar utilizada en la calibración del aparato (Nota 9).

e = porosidad de la cama preparada para la muestra de prueba (Nota 9).

ees = porosidad de la cama preparada para la muestra estándar utilizada en la calibración del aparato (Nota 9).

r = densidad de la muestra de prueba (para el cemento portland un valor de $3.15 \text{ Mg}/\text{m}^3$ o $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ debe ser utilizado).

r_s = densidad de la muestra estándar utilizada en la calibración del aparato (se asume que sea 3.15 Mg/m^3 o 3.15 g/cm^3).

b = constante específica para la muestra de prueba (para cemento hidráulico una válvula de 0.9 se debe utilizar).

$b_s = 0.9$, constante para la muestra estándar.

Nota 8: tras la compra de las muestras SRM serie 114, viene un certificado el cual indica el valor apropiado de la superficie específica.

Nota 9: los valores \sqrt{n} , $\sqrt{\varepsilon_3}$ y \sqrt{T} pueden ser tomados de las tablas 1 y 3 de la norma ASTM C204-11. (Ver apéndices).

Las ecuaciones 3 y 4 deben ser utilizadas en el cálculo de la finura del cemento compacto portland a la misma porosidad que la muestra de finura estándar. La ecuación 3 es utilizada si la temperatura de la prueba está dentro de los 63°C de la temperatura de la prueba de calibración, y la ecuación 4 es utilizada si la temperatura de la prueba está fuera de este rango.

Las ecuaciones 5 y 6 deben ser utilizadas en el cálculo de la finura del cemento compacto portland, a una porosidad distinta que la muestra de finura estándar utilizada en la prueba de calibración. La ecuación 5 es utilizada si la temperatura de la prueba está dentro de los 63°C de la temperatura de la prueba de calibración de la muestra de finura estándar, y la ecuación 6 es utilizada si la temperatura de la prueba está fuera de este rango.

Las ecuaciones 7 y 8 deben ser utilizadas para el cálculo de la finura de materiales que no sea el cemento portland. La ecuación 7 puede aplicarse

cuando la temperatura de prueba de la muestra es dentro 63°C de la temperatura de calibración de la prueba, y la ecuación 8 podrá utilizarse si la temperatura de prueba de la muestra está fuera de este rango.

Es recomendable que los valores de “b” sean determinados en no menos de 3 muestras del material en cuestión. Cada muestra se probó con un mínimo de cuatro diferentes porosidades, sobre el rango de porosidad de por lo menos 0.06. Los coeficientes de correlación deben exceder 0.9979 para la correlación de $\sqrt{\varepsilon 3T}$ contra ε en cada muestra probada.

Para calcular la superficie específica de las válvulas en metros cuadrados por kilogramo, se multiplica el área de la superficie en cm^2/g por el factor 0.1.

Se redondearon valores en cm^2/g con una precisión de 10 unidades (en m^2/kg a la unidad más cercana). Ejemplo: 3447 cm^2/g es redondeado a 3450 cm^2/g o 345 m^2/kg .

2.4.7. Fracción soluble en agua

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C 593-06(2011) *Standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime for soil stabilization*.

2.4.7.1. Procedimiento

Se colocaron 10 g de una muestra de material seco (secada hasta masa constante en un horno a 105 a 110 °C) en un frasco de 200 ml Erlenmeyer y se añadió 100 ml de agua destilada a 23 ± 2 °C, se agitó bien con la mano hasta que ya no se observaron grumos; a continuación, con un agitador mecánico, se

agitó a temperatura ambiente del laboratorio durante un periodo de 1 h. Se vertió el material en un crisol de vidrio, y se lavaron todos los residuos adheridos en el crisol mediante lavados repetidos con agua destilada. Se secó el crisol a peso constante en un horno a 105 °C.

2.4.7.2. Cálculo

Se calculó el porcentaje de la fracción soluble en agua, multiplicando la pérdida de peso en gramos por 10.

2.4.8. Pérdida por ignición

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C114-11b *Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*.

2.4.8.1. Procedimiento

Se pesó 1 g de la muestra en una tara de crisol de platino y se quemó en un horno de mufla a una temperatura de 950 ± 50 °C, durante 15 minutos. Se enfrió a temperatura ambiente en un desecador y se pesó. Sin haber chequeado el peso constante, cuidadosamente se transfirió el material quemado en un biquer de 400 ml. Se rompieron los grumos en el material quemado con el extremo plano de una varilla de vidrio.

Se determinó el contenido de SO₃ (Nota 10). También se determinó el contenido del SO₃ de una porción del mismo cemento que no ha sido quemado, usando el mismo procedimiento.

Nota 10: algunos de los ácidos utilizados para la disolución de la primera muestra se puede calentar en el crisol de platino, para disolver cualquier material adherido.

2.4.8.2. Cálculo

Se calculó el porcentaje de peso perdido durante la quema y se agregó 0.8 veces la diferencia entre el % de SO_3 en la muestra quemada y en la muestra original (Nota 11). Se reportó el porcentaje corregido como pérdida por ignición.

Nota 11: si la ganancia de peso se obtuvo durante la ignición, restar el porcentaje de ganancia a partir de la corrección de SO_3 .

2.5. Interpretación de resultados

Se realizó una interpretación de todos los resultados de los ensayos realizados y posteriormente a un análisis, fueron comparados con las recomendaciones de las normas ASTM correspondientes a cada ensayo para una clasificación del material.

2.6. Redacción del contenido del trabajo

Con la interpretación y el análisis de los resultados, se procedió a redactar el contenido del trabajo, donde se detalla la realización de los ensayos, así como los resultados obtenidos en ellos. Al final del trabajo se incluyeron los mapas utilizados para la ubicación de los bancos y la ruta que se siguió en los recorridos realizados. Se incluyen los documentos utilizados en el campo para

anotar datos geográficos y las características de los bancos, y por último, los documentos donde se anotaron los resultados de los ensayos.

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN LAS MUESTRAS DE PUZOLANAS SEGÚN NORMAS DE LA SOCIEDAD AMERICANA PARA ENSAYOS DE MATERIALES –ASTM–

3.1. Ubicación de bancos potenciales

Para la ubicación de los lugares se utilizaron mapas obtenidos en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) los cuales fueron escaneados para un mejor manejo a través de un software. En la tabla 1 se presentan el nombre del mapa, la hoja de referencia y su escala.

Tabla I. Mapas utilizados en la investigación

| MAPAS UTILIZADOS | | |
|-------------------------|--------------------|-------------|
| Nombre del mapa | Hoja de referencia | Escala |
| Mapa Red Vial Guatemala | | 1 : 750,000 |
| Amatitlán | 2059 II | 1 : 50,000 |
| Guatemala | 2059 I | 1 : 250,000 |
| Quetzaltenango | 1860 I | 1: 50,000 |
| Tecpán Guatemala | 2060 III | 1: 50,000 |
| Sololá | 1960 II | 1: 50,000 |
| Totonicapán | 1960 IV | 1: 50,000 |
| Chimaltenango | 2059 IV | 1: 50,000 |
| San José Pinula | 2159 IV | 1: 50,000 |

Fuente: elaboración propia.

Tanto el mapa donde se señala la ruta que se siguió para visitar los bancos como el mapa donde se delimitan las áreas donde se encuentra depositado el material en estudio, se pueden consultar en los anexos de este trabajo. En la tabla No. 1 se muestra el área aproximada de cada banco así como el volumen, también aproximado, según lo observado en campo.

Tabla II. **Ubicación y dimensionamiento de los bancos**

| ÁREAS POR DEPARTAMENTO | | | | | |
|-------------------------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|--|--|
| Departamento | Id | Área (Km²) | Estrato aproximado (Km) | Volumen aproximado (Km³) | Muestra extraída |
| Quetzaltenango | QZ1 | 53.4 | 0.05 | 2.67 | |
| | QZ2 | 40.0 | 0.05 | 2.00 | |
| | QZ3 | 92.1 | 0.05 | 4.61 | SX1-SX2 |
| Totonicapán | T1 | 461.5 | 0.05 | 23.07 | |
| | T2 | 51.8 | 0.05 | 2.59 | SFA |
| Sololá | S1 | 221.6 | 0.05 | 11.08 | Argueta, 1N, F y GR. |
| | S2 | 30.5 | 0.05 | 1.53 | |
| | S3 | 13.3 | 0.05 | 0.67 | |
| | S4 | 5.1 | 0.05 | 0.25 | |
| Chimaltenango | CH1 | 798.3 | 0.05 | 39.92 | 1Parra, LC, 1C, 2T-2T'. |
| Guatemala | G1 | 1385.2 | 0.05 | 69.26 | SU, Bar F, 1P, Alka Seltzer, KM 55 Sanarate. |

Fuente: elaboración propia.

3.2. Obtención de muestras

Para la obtención de las muestras se realizaron dos recorridos. En el recorrido preliminar se obtuvo un listado de bancos potenciales de los cuales se escogieron 7 para realizar un segundo recorrido y extraer las muestras.

3.2.1 Recorrido preliminar

Durante el recorrido preliminar se obtuvo el siguiente listado de puntos, cada uno con sus características y con los datos importantes:

- Km 203 (señalización carretera) – Km 206.5 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Según Bonis, en este lugar se encuentran suelos graníticos, conteniendo abundantes peñascos de granito. Banco fuertemente explotado observándose aún bloques de granito de regular tamaño. (Ver figura 3).

Figura 3. Banco de suelo granítico



Fuente: Km 203 carretera CA-1.

- Km 202.4 (señalización carretera) – Km 205.9 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Se observó la falta de los peñascos residuales de granito biotítico rosado, se cree que esto fue debido a que en los últimos años hubo una gran explotación de este material. (Ver figura 4).

Figura 4. **Área plana formada por rellenos de pómez cuaternaria**



Fuente: Km 202.4 carretera CA-1.

- Km 200 (señalización carretera) – Km 203.5 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Según Bonis, suelos y toba soldada dacítica terciaria. La abundancia de guijarros de granito sugiere la presencia de roca firme de granito. El área plana que se observa en el valle hacia el oeste, está formada por rellenos de pómez cuaternaria.
- Km 196 (señalización carretera) – Km 199.5 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Bonis describe una extensa cuenca de pómez Cuaternaria. Pequeño cañón al este, mostrando características

paredes escarpadas erosionadas por arroyos jóvenes en pómez. (Ver figura 5).

Figura 5. **Banco de extensa cuenca de pómez cuaternaria**



Fuente: Km 196 carretera CA-1.

- Km 192 (señalización carretera) – Km 195.5 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Bonis describe buen afloramiento de pómez suelta, no clasificada ni estratificada, característica de muchas cuencas de pómez cuaternaria en Guatemala. (Ver figura 6).

Figura 6. **Depósito de pómez muy fina y fragmentos de hasta 50 cm de diámetro**



Fuente: Km 192 carretera CA-1.

- Km 189.4 (señalización carretera) – Km 192.9 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Bonis describe una vista panorámica de la parte oriental del valle de Quetzaltenango. Valle plano formado por rellenos de pómez e ignimbrita producto de erupciones del volcán Siete Orejas, el cual está situado al oeste del cono simétrico llamado Volcán Santa María. (Ver figura 7).

Figura 7. **Vista oriental del valle de Quetzaltenango**



Fuente: Km 189.4 carretera CA-1.

- Km 187.1 (señalización carretera) – Km 192.6 (kilometraje continuo con cuatro caminos) carretera CA-1. Aproximadamente a 6 m del suelo una franja de color rosado de aproximadamente 3 m de espesor. El resto del banco de color blanco con una capa vegetal superior, de aproximadamente 1 m de espesor. (Ver figura 8).

Figura 8. **Banco de pómez cuaternaria ubicado en San Francisco el Alto**



Fuente: Km 187.1 carretera CA-1.

- Lugar: carretera Departamental 9N, Referencias Bloquera San Francisco y Gasolinera Santiago. Banco con cenizas que incluyen cenizas, bombas y bloques de pómez, los espesores visibles aproximados son de 15 metros. La capa vegetal superficial es muy pequeña. El material ha sido bastante explotado y se ha utilizado en la construcción de carreteras y bases de pisos de viviendas y edificios. Se observan muchas colinas a los alrededores del mismo material. (Ver figura 9).

Figura 9. **Banco explotado para la fabricación de bloques para la construcción**



Fuente: Carretera departamental 9N.

- Lugar: Km. 175.3 (señalización carretera) carretera CA1. Franjas alternas de lapillis grueso de aproximadamente 1 m. de espesor y por debajo lapillis más fino de aproximadamente 2 m. de espesor con un ángulo de inclinación de 15 grados sobre la horizontal, por debajo se encuentran capas alternas de pómez y paleosuelo con un espesor de 6 m. su altura total aproximada es de 8 metros. (Ver figura 10).

Figura 10. **Banco con franjas alternas de lapilli grueso y fino**



Fuente: Km 175.3 carretera CA-1.

- Km 160 (señalización carretera) carretera CA1. Se pudo observar presencia de lapillis de pómez (arena) de color blanco de aproximadamente 2 m. de espesor colocada por debajo de capas alternas de pómez y paleosuelo de 6 m. de espesor. Por debajo de la pómez subyacen capas gruesas de sedimentos de pómez con estructura laminar horizontal. Banco explotado para extraer material y utilizarlo en la construcción. (Ver figura 11).

Figura 11. **Banco fuertemente explotado ubicado en Nahualá, Sololá**



Fuente: Km 160 carretera CA-1.

- Km 140 (señalización carretera) carretera CA1, aldea Argueta. Pómez cuaternario de lo más común, color beige con un espesor visible de aproximadamente 50 m. Bonis describe una cuenca de pómez Cuaternaria cubierta por pómez subárea con afloramientos poco frecuentes de rocas volcánicas terciarias infrayacentes. (Ver figura 12).

Figura 12. **Banco de pómez cuaternaria de lo más común, ubicado en Argueta, Sololá**



Fuente: Km 140 carretera CA-1.

- Km 86.3 (señalización carretera) carretera CA1, Tecpán. Se observa pómez desde cenizas hasta bombas con una altura visible de 40 m, aproximadamente. (Ver figura 13).

Figura 13. **Banco con una altura aproximada de 40 m ubicado en Tecpán**



Fuente: Km 86.3 CA-1.

- Km. 76.7 (señalización carretera) carretera departamental 1, Patzicía-Patzún. Según recorrido actual, a nivel del suelo hay una capa rosada aproximadamente de 2 m. de espesor, sobre ella, una capa de lapillis con tamaño de grano de mediano a fino de 10 m de espesor, aproximadamente. (Ver figura 14).

Figura 14. **Banco con abundante material suelto**



Fuente: Km 76.7 carretera departamental 1 Patzicía-Patzún.

- Km. 83.4 (señalización carretera) camino a Pachimulín. En este banco se nota carbón vegetal natural, proveniente de ramas de árboles sepultadas en la pómez blanca. Se tomaron muestras del carbón localizado en ese sitio para estudios posteriores. (Ver figura 15).

Figura 15. **Banco en el que se observa carbón vegetal natural**



Fuente: Km 83.4 camino a Pachimulín

- Km. 74.8 (señalización carretera) de la carretera que conduce de Zaragoza hacia Comalapa. Según recorrido actual, se encontró lapilli de color beige altura nivel suelo de 10 m. Banco de pómez cuaternaria, el cual no ha sido explotado, de aproximadamente 5 m de altura cubierto con una capa vegetal muy pequeña. El volumen del banco es pequeño comparado con otros bancos ya visitados. (Ver figura 16).

Figura 16. **Banco pequeño de pómez cuaternaria**



Fuente: Km 74.8 de Zaragoza hacia Comalapa.

- Bárcenas camino a Villa Nueva. Según recorrido actual arena pómez en espesores que oscilan entre 2 y 8 m. con una capa superior de limos, con un grosor aproximadamente de 40 cm. Se encontró una capa vegetal de aproximadamente de 10 y 20 cm. Es un banco de muy fácil extracción y se pudo observar que ha sido fuertemente explotado. (Ver figura 17).

Figura 17. **Banco fuertemente explotado para la venta de materiales de construcción**



Fuente: Barcnas camino a Villa Nueva.

3.2.2. Recorrido para extracción de muestras

Para la extracción de las muestras se redujo el número de bancos de 15 a 7, considerando estos como los más apropiados para la extracción de las muestras e identificándolos de la siguiente manera, según la población más cercana.

Banco No. 1:

Tabla III. **Datos del banco identificado como SFA**

| | |
|-----------------------------|---|
| Nombre del banco | San Francisco el Alto (SFA) |
| Coordenadas | Longitud: W91° 26' 21.8" Latitud: N14° 55' 40.2" |
| Altitud (msnm) | 2442 |
| Referencia del lugar | Km. 187.13 Carretera CA-1, cerca de la entrada a la población de San Francisco el Alto. |
| Tipo de material | Cenizas consolidadas |

Fuente: elaboración propia.

Este banco puede observarse en la figura 8.

Banco No. 2:

Tabla IV. **Datos del banco identificado como SX1G y SX2F**

| | |
|-----------------------------|---|
| Nombre del banco | Salcajá / Xela (SX1G y SX2F) |
| Coordenadas | Longitud: W91° 28' 20.4" Latitud: N14° 51' 37.5" |
| Altitud (msnm) | 2350 |
| Referencia del lugar | Bloquera San Francisco y gasolinera Santiago. |
| Tipo de material | Cenizas y bombas |

Fuente: elaboración propia.

Este banco puede observarse en la figura 9.

Banco No. 3:

Tabla V. **Datos del banco identificado como 1N**

| | |
|-----------------------------|--|
| Nombre del banco | Nahualá (1N) |
| Coordenadas | Longitud: W91° 19' 51" Latitud: N14° 50' 2.2" |
| Altitud (msnm) | 2496 |
| Referencia del lugar | Km. 160, Carretera CA-1 |
| Tipo de material | Tefra de lapilli de pómez. Arena |

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Banco de donde se extrajo la muestra 1N**



Fuente: Km 160 carretera CA-1.

Banco No. 4:

Tabla VI. **Datos del banco identificado como 2TF y 2T'G**

| | |
|-----------------------------|---|
| Nombre del banco | Tecpán (2TF y 2T'G) |
| Coordenadas | Longitud: W90° 58' 32.8" Latitud: N14° 45' 23.7" |
| Altitud (msnm) | 2347 |
| Referencia del lugar | Km.86.3 Carretera CA-1 |
| Tipo de material | Pómez lapilli desde cenizas hasta bombas. |

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Banco de donde se extrajeron las muestras 2TF y 2T'G**



Fuente: Km 86.3 carretera CA-1.

Banco No. 5:

Tabla VII. **Datos del banco identificado como LC**

| | |
|-----------------------------|---|
| Nombre del banco | La Canoa (LC) |
| Coordenadas | Longitud: W90° 58' 17.7" Latitud: N14° 39' 34.2" |
| Altitud (msnm) | 2099 |
| Referencia del lugar | Km. 76+750 carretera a Patzún |
| Tipo de material | Lapilli |

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Banco de donde se extrajo la muestra LC**



Fuente: Km 76.7 carretera departamental 1 Patzicía-Patzún.

Banco No. 6:

Tabla VIII. **Datos del banco identificado como 1C**

| | |
|-----------------------------|--|
| Nombre del banco | Comalapa (1C) |
| Coordenadas | Longitud: W90° 54' 6.8" Latitud: N14° 41' 57.9" |
| Altitud (msnm) | 2046 |
| Referencia del lugar | Km. 74+800 de la CA-1 hacia Comalapa. |
| Tipo de material | Ceniza y arena de pómez |

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Banco de donde se extrajo la muestra 1C**



Fuente: Km 74.8 carretera que conduce de Zaragoza hacia Comalapa.

Banco No. 7:

Tabla IX. **Datos del banco identificado como Bar F**

| | |
|-----------------------------|---|
| Nombre del banco | Barcenas (Bar F.) |
| Coordenadas | Longitud: W 90°37' 34.5" Latitud: N 14°33' 19" |
| Altitud (msnm) | 1653 |
| Referencia del lugar | Barcenas camino a Villa Nueva. |
| Tipo de material | Arena de pómez |

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Banco de donde se extrajo la muestra Bar F**



Fuente: Bárcenas camino a Villa Nueva.

3.3. Resultados en las muestras antes de la molienda

Antes de que las muestras fueran molidas se les realizaron varios ensayos en su estado natural.

3.3.1. Determinación del contenido de humedad de las muestras

En la figura 23 se observa la muestra dentro del horno para determinar el contenido de humedad de las muestras siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D 2216-10 *standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*.

En la tabla X se muestran los resultados.

Figura 23. **Muestra del material dentro del horno**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla X. **Contenido de humedad de las muestras**

| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Muestra | Masa húmeda (kg) | Masa seca (kg) | % de humedad |
| SFA | 15 | 14.32 | 4.75 |
| SX1G | 15 | 11.21 | 33.81 |
| SX2F | 15 | 13.41 | 11.86 |
| 1N | 15 | 10.17 | 47.49 |
| 2TF | 15 | 11.44 | 31.12 |
| 2T'G | 15 | 10.23 | 46.63 |
| LC | 15 | 13.64 | 9.97 |
| 1C | 15 | 13.95 | 7.52 |
| BAR F. | 15 | 14.63 | 2.53 |

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Tamiz de ¼"

Solamente 4 muestras fueron tamizadas con el tamiz de ¼" debido a que estas presentaban algunos gruesos en su contenido. El tamizado se realizó después de que el material fuera molido a mano. En la tabla XI se muestran los resultados.

Tabla XI. **Porcentaje que pasa el tamiz de ¼”.**

| TAMIZ DE ¼” | | | |
|--------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Muestra | Peso muestra (Kg) | Peso retenido (Kg) | % Que pasa |
| SFA | - | - | 100 |
| SX1G | 11.21 | 3 | 73.15 |
| SX2F | 13.41 | 0.04 | 99.71 |
| 1N | - | - | 100 |
| 2TF | 21.38 | 2.92 | 86.35 |
| 2T'G | - | - | 100 |
| LC | - | - | 100 |
| 1C | 19.41 | 0.85 | 95.60 |
| Bar F. | - | - | 100 |

Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Tamiz No. 30 y No. 200

Siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 110-11 *standard test methods for physical testing of quicklime, hydrated lime, and limestone* Se colocó el tamiz No. 30 sobre el tamiz No. 200 y se lavó con una corriente de agua ajustada a 10 psi, tal como se muestra en las figuras 24 y 25, respectivamente.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas XII y XIII.

Figura 24. Tamiz No. 30 sobre el tamiz No. 200 siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 110-11



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 25. Lavado del Tamiz No. 30 sobre el tamiz No. 200 con una corriente de agua ajustada a 10 psi



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XII. **Porcentaje que pasa el tamiz No. 30**

| TAMIZ No. 30 | | | |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Muestra | Peso muestra (gr) | Peso retenido (gr) | % Que pasa |
| SFA | 400 | 97.00 | 75.75 |
| SX1G | 359 | 139.00 | 61.28 |
| SX2F | 400 | 150.00 | 62.50 |
| 1N | 400 | 244.00 | 39.00 |
| 2TF | 400 | 116.00 | 71.00 |
| 2T'G | 400 | 110.00 | 72.50 |
| LC | 400 | 139.00 | 65.25 |
| 1C | 400 | 86.00 | 78.50 |
| Bar F | 400 | 127.48 | 68.13 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Porcentaje que pasa el tamiz No. 200**

| TAMIZ No. 200 | | | |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Muestra | Peso muestra (gr) | Peso retenido (gr) | % Que pasa |
| SFA | 307 | 211.00 | 31.27 |
| SX1G | 200 | 141.00 | 29.50 |
| SX2F | 251 | 172.00 | 31.47 |
| 1N | 150 | 142.00 | 5.33 |
| 2TF | 200 | 154.00 | 23.00 |
| 2T'G | 400 | 311.50 | 22.13 |
| LC | 265 | 211.00 | 20.38 |
| 1C | 200 | 146.00 | 27.00 |
| Bar F | 200 | 142.00 | 29.00 |

Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Molienda de las muestras

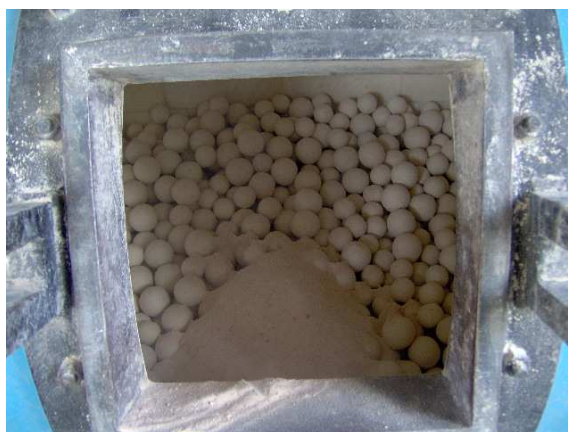
Se siguió el procedimiento descrito en la metodología, en el numeral 2.3.4. Las fotografías 26, 27 y 28 muestran parte del proceso.

Figura 26. **Molino de bolas en funcionamiento**



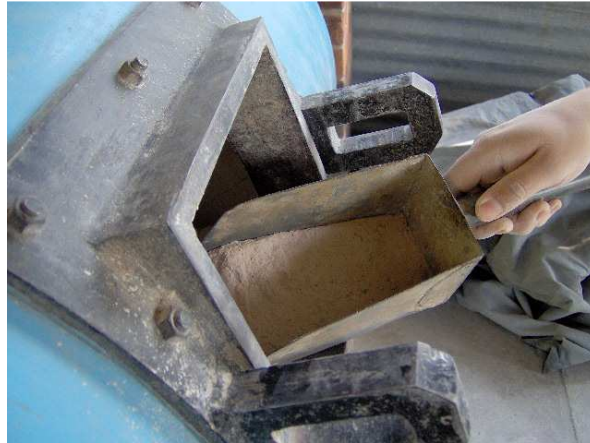
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 27. **Bolas de dos diámetros distintos dentro del molino**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 28. **Extracción de muestra a cada hora de molienda**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.4. Resultados en las muestras después de la molienda

Luego que las muestras fueron molidas, se les realizaron varios ensayos para su caracterización.

3.4.1. Tamiz No. 325

Se siguió el procedimiento descrito en la norma astm c 430-08 *standard test method for fineness of hydraulic cement by the 45- μ m (no. 325) sieve*. En las fotografías 29, 30 y 31 se muestra parte del proceso. Los resultados se muestran en la tabla XIV.

Figura 29. **Humedecimiento de los 2 g de muestra**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 30. **Ajuste de la presión del aspersor de agua a 10 psi**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 31. **Lavado de la muestra mediante movimientos circulares**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XIV. **Porcentaje que pasa el tamiz No. 325**

| TAMIZ 325 | | | | | | |
|-----------|----------------------------|-------------------|--------------------|-------|-------|--------|
| Muestra | Tiempo de molienda (horas) | Peso muestra (gr) | Peso retenido (gr) | C | Rc | % pasa |
| SFA | 1 | 2.17 | 0.39 | 20.27 | 47.27 | 52.73 |
| | 2 | 2.41 | 0.07 | 20.27 | 8.78 | 91.22 |
| | 3 | 2.18 | 0.00 | 20.27 | 0.36 | 99.64 |
| SX1G | 1 | 1.96 | 0.12 | 20.27 | 14.91 | 85.09 |
| | 2 | 1.83 | 0.03 | 20.27 | 3.13 | 96.87 |
| | 3 | 1.90 | 0.01 | 20.27 | 0.72 | 99.28 |
| SX2F | 1 | 2.07 | 0.26 | 20.27 | 31.51 | 68.49 |
| | 2 | 2.04 | 0.01 | 20.27 | 1.32 | 98.68 |
| | 3 | 2.16 | 0.01 | 20.27 | 0.72 | 99.28 |
| 1N | 1 | 2.12 | 0.65 | 20.27 | 78.42 | 21.58 |
| | 2 | 2.09 | 0.14 | 20.27 | 17.32 | 82.68 |
| | 3 | 2.09 | 0.00 | 20.27 | 0.36 | 99.64 |
| 2TF | 1 | 2.57 | 0.30 | 20.27 | 36.08 | 63.92 |
| | 2 | 2.52 | 0.20 | 20.27 | 23.69 | 76.31 |
| | 3 | 2.30 | 0.00 | 20.27 | 0.36 | 99.64 |
| 2T'G | 1 | 2.17 | 0.10 | 20.27 | 12.51 | 87.49 |
| | 2 | 2.15 | 0.06 | 20.27 | 7.70 | 92.30 |
| | 3 | 2.10 | 0.01 | 20.27 | 0.84 | 99.16 |
| LC | 1 | 2.06 | 0.57 | 20.27 | 68.91 | 31.09 |
| | 2 | 2.27 | 0.02 | 20.27 | 2.77 | 97.23 |
| | 3 | 2.27 | 0.01 | 20.27 | 0.84 | 99.16 |
| 1C | 1 | 2.26 | 0.60 | 20.27 | 72.40 | 27.60 |
| | 2 | 2.11 | 0.21 | 20.27 | 25.14 | 74.86 |
| | 3 | 2.04 | 0.00 | 20.27 | 0.24 | 99.76 |
| BAR F | 1 | 2.00 | 0.55 | 20.27 | 66.15 | 33.85 |
| | 2 | 2.00 | 0.02 | 20.27 | 2.41 | 97.59 |
| | 3 | 2.00 | 0.01 | 20.27 | 1.20 | 98.80 |

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Densidad del cemento hidráulico

Se siguieron las indicaciones de la norma ASTM C 188-09 *standard test method for density of hydraulic cement*. En las figuras 32, 33 y 34 se muestra parte del proceso y los resultados se muestran en la tabla XV.

Figura 32. **Llenado del matraz con keroseno**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 33. **Colocación de la muestra dentro del matraz**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 34. **Colocación del matraz dentro del baño María**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XV. Densidad de las muestras

| Banco | Densidad (g/ml) | Desviación estándar (g/ml) | Coefficiente de variación |
|-------|-----------------|----------------------------|---------------------------|
| SFA | 2.3642 | ±0.0237 | 0.010 |
| SX1G | 2.4641 | ±0.0687 | 0.028 |
| SX2F | 2.4300 | ±0.0012 | 0.000 |
| 1N | 2.5220 | ±0.0087 | 0.003 |
| 2TF | 2.3815 | ±0.0003 | 0.000 |
| 2T'G | 2.3719 | ±0.0476 | 0.020 |
| LC | 2.3873 | ±0.0082 | 0.003 |
| 1C | 2.3953 | ±0.0019 | 0.000 |
| BARF | 2.6007 | ±0.0088 | 0.003 |

Fuente: elaboración propia.

3.4.3. Finura del cemento hidráulico por el aparato de permeabilidad al aire

Se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C 204-11 *standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus*.

La calibración del aparato se realizó según lo descrito en el numeral 2.4.6.1. del capítulo anterior. Las figuras 35 y 36 muestran parte del proceso. Los resultados de la calibración se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. Datos para la 1ª calibración de la celda

| No. | Temperatura (°C) | Densidad del mercurio (g/cm³) | Wa (g) | Wb (g) | V (cm³) | T (s) |
|-----|------------------|-------------------------------|---------|--------|---------|-------|
| 1 | 23.5 | 13.54 | 104.052 | 78.691 | 1.873 | 59.94 |
| 2 | 23.5 | 13.54 | 104.053 | 78.673 | 1.875 | 59.94 |

Fuente: elaboración propia.

$$V_{\text{promedio}}: 1.874 \text{ cm}^3$$

$$T_{\text{promedio}}: 59.94 \text{ segundos}$$

Debido a un accidente en el laboratorio, fue necesaria una segunda calibración de la celda; en la tabla No. XVII se muestran los resultados.

Tabla XVII. Datos para la 2ª calibración de la celda

| No. | Temperatura (°C) | Densidad del mercurio (g/cm³) | Wa (g) | Wb (g) | V (cm³) | T (s) |
|-----|------------------|-------------------------------|---------|--------|---------|-------|
| 1 | 23.5 | 13.54 | 104.043 | 78.316 | 1.899 | 49.82 |
| 2 | 23.5 | 13.54 | 104.001 | 78.343 | 1.895 | 53.84 |

Fuente: elaboración propia.

$$V_{\text{promedio}}: 1.897 \text{ cm}^3$$

$$T_{\text{promedio}}: 51.83 \text{ segundos}$$

Figura 35. **Calibración de celda para ensayo de permeabilidad al aire**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 36. **Peso de la celda + cemento + mercurio para ensayo de permeabilidad al aire**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

La prueba de permeabilidad se realizó según lo descrito en el numeral 2.4.6.2. del capítulo anterior. Las figuras 37 y 38 muestran parte del proceso. Los resultados de la calibración se muestran en la tabla XVII.

Figura 37. **Peso de la muestra a ensayar en aparato de permeabilidad al aire**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 38. **Realización del ensayo de permeabilidad al aire**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XVIII. **Datos de permeabilidad al aire de las muestras**

| Muestra | Superficie Especifica (cm² / g) | Desviación Estándar (%) | Coefficiente de Variación |
|----------------|---|--------------------------------|----------------------------------|
| SFA | 3036 | ±17.51 | 0.58 |
| SX1G | 7441 | ±9.42 | 0.13 |
| SX2F | 4059 | ±3.68 | 0.09 |
| 1N | 5469 | ±6.37 | 0.12 |
| 2TF | 3619 | ±3.12 | 0.09 |
| 2T'G | 6368 | ±2.55 | 0.04 |
| LC | 3220 | ±13.17 | 0.41 |
| 1C | 3800 | ±6.04 | 0.16 |
| BAR F. | 3983 | ±3.63 | 0.09 |

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Fracción soluble en agua

Tomando en cuenta las indicaciones de la Norma ASTM C 114-11 *standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement* se procedió a realizar el ensayo de fracción soluble en agua de las 8 muestras, con dos horas de molienda. Las figuras 39 y 40 muestran parte del proceso. Los resultados se presentan en la tabla No. XIX.

Figura 39. Realización del ensayo fracción soluble en agua



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XIX. Resultados de la fracción soluble en agua de las muestras.

| FRACCIÓN SOLUBLE EN AGUA | | |
|--------------------------|-------|-------------------------|
| Muestra | % FS | Desviación estándar (%) |
| SFA | 11.85 | ±1.06 |
| SX1G | 17.60 | ±0.57 |
| SX2F | 15.05 | ±0.49 |
| 1N | 12.45 | ±6.72 |
| 2TF | 20.75 | ±1.91 |
| 2T'G | 11.78 | ±0.00 |
| LC | 18.10 | ±3.96 |
| 1C | 17.75 | ±0.00 |
| BARF | 16.84 | ±4.45 |

Fuente: elaboración propia.

3.4.5. Pérdida por ignición

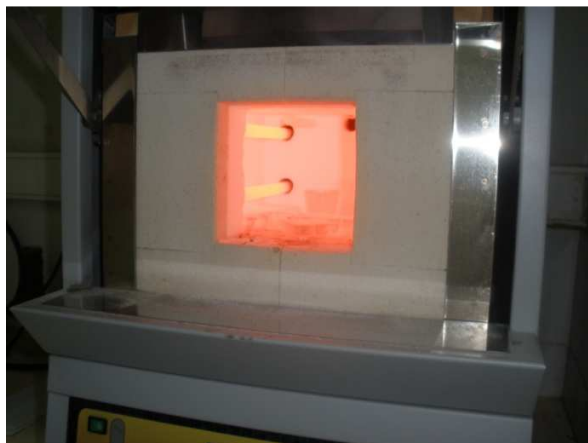
Tomando en cuenta las indicaciones de la Norma ASTM C114-11b *standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*, se procedió a realizar el ensayo de pérdida por ignición de las 8 muestras, con dos horas de molienda. La figura 41 muestra parte del proceso. Los resultados se muestran en la tabla XIX.

Figura 40. **Crisol conteniendo la muestra para realizar el ensayo de pérdida por ignición**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 41. **Mufla utilizada para realizar el ensayo de pérdida por ignición**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XX. **Resultados de la pérdida por ignición de las muestras**

| Banco | % Perdida por ignición | Desviación Estándar (%) |
|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| SFA | 2.26 | ±0.03 |
| SX1G | 2.32 | ±0.03 |
| SX2F | 2.09 | ±0.13 |
| 1N | 1.68 | ±0.31 |
| 2TF | 2.75 | ±0.06 |
| 2T'G | 2.63 | ±0.29 |
| LC | 3.15 | ±1.58 |
| 1C | 2.67 | ±0.12 |
| BARF | 1.91 | ±0.01 |

Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. De la ubicación de bancos potenciales

Los bancos visitados presentan gran cantidad del material en estudio; estos materiales se pueden clasificar como cenizas, bombas, bloques, lapillis, y arenas. En algunos de los bancos se pudo observar una franja de color rosado salmón que pudo haberse producido por la oxidación del material al momento de enfriarse.

Esta franja rosada se puede observar a una altura considerablemente alta en los bancos más alejados, llegando a tener en su parte más baja una altura de aproximadamente 6 m y en su parte más alta una altura de aproximadamente 9 m; teniendo un espesor de 3 m, como es el caso del banco denominado SFA correspondiente a San Francisco el Alto, Totonicapán. Mientras que en los bancos localizados en un área más céntrica, esta franja se puede observar a nivel del suelo con un espesor aproximado de 2 m, como se pudo observar en el banco denominado LC, correspondiente a la carretera departamental 1, que conduce de Patzicía a Patzún, Chimaltenango.

En bancos como el que está ubicado en la carretera que conduce de Salcajá a Xela, identificado como SX1G y SX2F y el banco ubicado Tecpán Chimaltenango, identificado como 2TF y 2T'G, esta capa de color rosado no se aprecia y esto podría ser debido a la altura del banco, ya que se encuentran 92 msnm más abajo del banco identificado como SFA que sí muestra esta franja.

Se pudo observar que el diámetro de los bloques también va variando dependiendo de la distancia que hay entre estos y los focos eruptivos, siendo más finos mientras más alejados están de estos focos. Los bancos que se encuentran más cerca de los focos eruptivos presentan bloques de regular tamaño, aproximadamente 30 cm, como es el caso de los bancos 2T'G y SX1G. Esto se debió a que el material con un diámetro mayor fue depositado en las cercanías de estos focos eruptivos, mientras que el material más fino quedó suspendido más tiempo en el espacio y las corrientes de aire lo transportaron y depositaron en áreas más alejadas como el caso de los bancos LC y 1C.

En los bancos donde se encontró el material con un tamaño de grano mayor, también se encontró material fino; posiblemente finos depositados combinados con los finos producidos por la meteorización del material existente en el banco.

Se tomó como base el tamaño del grano de las muestras para hacer una clasificación de estas con base en los resultados de los ensayos anteriores y lo visto en el campo. En el banco identificado como SFA, el material encontrado se pudo clasificar como toba con incrustaciones de lapilli y bombas de pómez color blanco, corroborándose con el resultado del ensayo del tamiz No. 30. La muestra pasa el tamiz en un 75.75%, indicando que la mayoría del material tiene un diámetro de grano menor a 0.6 mm.

En el banco identificado como SX1G y SX2F, se corroboró que el material eran tobas de pómez color beige pero en menor cantidad que en el banco anterior. La muestra pasa el tamiz No. 30 en un promedio de 61.89%. El material que quedó retenido se puede clasificar como bombas de pómez color blanco, presentando un tamaño de grano de aproximadamente 3 cm.

En el banco identificado como 1N el material extraído es una lapilli de pómez color blanco presentando un tamaño de grano mayor a 0.6 mm, ya que solo el 39% de este material pasó el tamiz No. 30 y una cantidad muy pequeña, igual al 5.33% que pasó el tamiz No. 200. Siendo la lapilli un material cuyo diámetro se encuentra entre 3 y 30 mm. El material de este banco cumple con esa característica.

El material extraído del banco identificado como 2TF y 2T'G presentó material con un tamaño de grano muy variado que va desde 3 cm hasta 30 cm. El material se pudo clasificar como una toba de pómez color beige, ya que la muestra en promedio pasa el tamiz No. 30 en un 71.75%. Mientras que la muestras del material con un diámetro de aproximadamente 30 cm se pudo clasificar como bombas de pómez color beige también.

La muestra extraída del banco identificado como LC luego de haberla tamizado arroja como resultado que el 65.25% pasa el tamiz No. 30 y el 20.38% pasa el tamiz No. 200. Se puede decir que el material es una ceniza de pómez de grano grueso con presencia de lapilli color blanco bastante suelta.

La muestra extraída del banco identificado como 1C presenta granos de un tamaño menor a 0.6 mm y una menor cantidad de granos menores a 0.075 mm; este dato se obtuvo luego de haber tamizado la muestra y que diera como resultado que un 78.5% de la muestra pasa por el tamiz No. 30 y que un 27% pasa por el tamiz No. 200. Por la cantidad de material que pasa dichos tamices, se pudo clasificar la muestra como tobas de pómez con incrustaciones de lapilli de pómez color blanco.

La muestra extraída del banco identificado como Bar F. presenta un tamaño de grano mayor a 0.6 mm ya que solo el 68.13 % pasa por el tamiz No. 30 y un 29% pasa el tamiz No. 200. Se pudo clasificar este material como lapilli con presencia de cenizas de pómez de color blanco. Esta muestra se encontró muy suelta en el banco.

4.1.1. De la ubicación de los bancos

Después de ubicar las coordenadas de todos los bancos de donde se extrajeron las muestras en el mapa geológico de Guatemala se puede decir que todo el material extraído se encuentra dentro del área delimitada e identificada como pómez cuaternaria, o muy cercana a un área de estas. Como sucede con el banco identificado como Salcajá/Xela (SX1G y SX2F) y el banco ubicado en Bárcenas (Bar F.). Es probable que no aparezcan dentro de la delimitación del mapa ya sea porque su volumen es pequeño y no se logra apreciar en el mapa o porque el mapa que se utilizó necesita algún tipo de actualización.

Con lo anterior se puede decir que el material en estudio es de origen volcánico de la era Cuaternaria. Este material se encuentra en gran parte de la región central y occidental del país, ubicándose en esta zona los bancos de mayor área. El material está distribuido en estratos de distintos tamaños y presentan distintas características que van desde el tamaño del grano hasta el color que presenta. Es muy difícil proporcionar un dato exacto que indique el volumen existente del material en esta región, pero por las observaciones hechas en campo, se puede dar un volumen aproximado de 158 Km³, que da un indicativo de la abundancia de este material en el país.

Por lo menos dos de los bancos que menciona S. Bonis en el documento *Excursión Guide Book for Guatemala* no fueron encontrados en el primer recorrido realizado en los lugares que él indicó. Se cree que esto se debe a que estos bancos fueron explotados fuertemente con anterioridad por los pobladores del lugar, ya que este material es comercializado para la utilización en la construcción de viviendas.

4.2. De los resultados de ensayos

Para la norma ASTM C 618-08a "*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, 2008*" el porcentaje máximo que debe ser retenido en el tamiz No. 325 es 34 % para una muestra tipo N (puzolana natural). La mayoría de las muestras presentaron una fineza bastante aceptable después de 1 hora de molienda, pero se decidió trabajar con las muestras extraídas después de 2 horas de molienda. Las muestras que presentaron un porcentaje más bajo fueron las identificadas como 2TF y 1C, dando como resultado 23.69% y 25.14% retenido respectivamente. El resto de las muestras dieron resultados promedio de 6.2% retenido.

En la muestra 2T'G que presenta una fineza alta con 1 hora de molienda se espera una reactividad puzolánica alta, después de pasar la muestra por el tamiz No. 325, esta dio como resultado que pasa un 87.49%. Cumpliendo, con 1 hora de molienda, la norma antes mencionada. Esto se puede interpretar como que es necesaria solamente una hora de molienda para llegar a una fineza adecuada sin utilizar mucha energía. Se espera que al ser ensayada mecánicamente, muestre propiedades por encima de los requisitos mínimos recomendados por las normas internacionales.

Con dos horas de molienda, los resultados mejoran aún más, la muestra que arroja el mejor resultado es la identificada como SX2F dando un valor del porcentaje que pasa el tamiz No. 325 igual a 98.68. A la tercera hora de molienda, todas las muestras arrojan resultados arriba del 98% que pasa el tamiz No. 325.

Para el ensayo de Pérdida por Ignición la norma ASTM C 114–11b “*Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*” indica un valor máximo del 10% y las muestras ensayadas arrojaron resultados que se encuentran en un rango que va de 1.86 a 3.15, siendo la muestra identificada como 1N la del valor menor y la muestra identificada como LC la de mayor valor. La muestra 1N al registrar este valor tan pequeño indica que contiene muy poca cantidad de materia orgánica, es decir que es la muestra menos contaminada por agentes externos y ajenos al material en estudio. El promedio de los valores de las muestras es de 2.38, siendo la muestra del banco identificado como SX1G la más cercana a este valor con 2.32%.

La muestra SX2F muestra un valor alto de fineza con poco tiempo de molienda y tiene un valor aceptable en la pérdida por ignición igual a 2.09%. Se espera que tenga una reactividad puzolánica alta y que mejore sus propiedades al ser mezclada con cemento portland, aunque ello depende también de su mineralogía.

La norma C114-11b “*Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*” indica que la fracción soluble en agua no debe ser mayor al 10%, pero todas las muestras arrojan resultados arriba de este valor, siendo el valor más bajo igual a 11.78 perteneciente a la muestra del banco identificado como 2T’G.

Según explica la licenciada Ingrid Lorena Benítez Pacheco, coordinadora del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de la sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, este parámetro tiene importancia en las características del material pero no tiene influencia directamente en las propiedades mecánicas de este, ya que estos valores solo son un indicativo de que la muestra tiene altos porcentajes de silicatos y aluminatos; estos, en presencia de agua son altamente solubles, pero con el tiempo brindan dureza y firmeza a la mezcla o combinación de agua y cemento. Sin embargo, al tener otros parámetros desfavorables a la reactividad puzolánica este valor podría tomar mayor importancia.

Después de haber realizado el ensayo de fineza según lo indica la norma ASTM C 204-11 "*Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*" se puede ver que los rangos de fineza de las muestras, con 2 horas de molienda, están en un rango que va desde 3036 cm²/g hasta 7441 cm²/g. Siendo la muestra identificada como SX1G la que presenta el mayor valor, el cual corresponde a 6368 cm²/g.

Muchos autores difieren entre cual es el mejor rango para esta propiedad que dé como resultado mejor reactividad, pero siguiendo los ensayos mecánicos que se están realizando al momento de redactar este documento, se pudo observar que la muestra 2T'G tiene un alto grado de reactividad al ser mezclada con cemento portland.

En el ensayo de pérdida por ignición da un porcentaje de 2.63 y en el ensayo de fracción soluble en agua, presenta el valor más bajo igual a 11.78%; siendo estos valores aceptables porque están dentro de los requerimientos mínimos de las normas que rigen cada uno de los ensayos realizados a las muestras.

El rango de superficie específica debe ser comparado con ensayos mecánicos para poder determinar un rango apropiado que beneficie esta propiedad. Las demás muestras han tenido resultados más altos de lo esperado en los ensayos mecánicos, realizados según especificaciones de las normas internacionales. Los resultados de estos ensayos mecánicos se encuentran en el informe del trabajo de graduación del Ingeniero Civil pablo José Bautista Gallardo.

CONCLUSIONES

1. Se recopiló información geológica de las puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala, encontrando como documentos principales los publicados por los exploradores Sapper, Bonnis, Dengo, Day, Arriaga y Quiñónez.
2. En los recorridos realizados se corroboró lo descrito en la parte teórica respecto de las características geológicas de los lugares donde se tomaron las muestras de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala, encontrando bancos con capas de material presumiblemente puzolana, depositadas algunas veces como bombas, lapillis, tobas y cenizas.
3. La ubicación de los bancos descritos en la bibliografía coinciden con lo encontrado en el campo, difiriendo algunos en el kilometraje, debido a una nueva señalización hecha a partir del lugar conocido como Cuatro Caminos. Es importante indicar que algunos bancos fueron fuertemente explotados y ya no se encuentran de la forma descrita en los documentos.
4. En la región que ocupan los departamentos de Guatemala, Sololá, Chimaltenango, Quetzaltenango y Totonicapán, existe gran cantidad de material piroclástico, presumiblemente puzolana, debido a que esta zona se ubica en la franja volcánica de Guatemala donde en el pasado hubo gran actividad, incluso actualmente, algunos volcanes siguen activos. Pero a medida que se recorre hacia el norte, este material es más escaso.

5. El material es muy fácil de moler. El molino de bolas marca Patterson con una capacidad de aproximada de 0.1 m^3 y las bolas utilizadas de diámetros iguales a 31.5 mm y 24.5 mm, fueron suficientes para que las muestras de puzolanas alcanzaran muy buena finura.
6. La muestra identificada como SFA es una toba color beige con incrustaciones de lapilli y bombas de pómez color blanco. La muestra pasa el tamiz No. 30 en un 75.75%, indicando que la mayoría del material en su estado natural tiene un tamaño de grano menor a 0.6 mm. Después de dos horas de molienda pasa el tamiz No. 325 en un 91.22%, mostrando una fineza alta. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de $3036 \text{ cm}^2/\text{g}$ y en la prueba de pérdida por ignición se perdió solamente el 2.26% de la muestra, indicando una fracción muy pequeña de impurezas.
7. Las muestras identificadas como SX1G y SX2F fueron extraídas del mismo banco pero presentan diferencias. SX1G presenta bombas de pómez color blanco con un tamaño de grano aproximado a 3 cm y SX2F es una toba de pómez color beige. Las muestras pasan el tamiz No. 30 en un 61.28% (después de la trituración) y 62.5%, respectivamente. Después de dos horas de molienda, la muestra SX1G pasa el tamiz No. 325 en un 96.87% y SX2F pasa el 98.68% mostrando una fineza alta. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de $7441 \text{ cm}^2/\text{g}$ para SX1G y de $4059 \text{ cm}^2/\text{g}$ para SX2G y en la pérdida por ignición presentaron una porción muy pequeña de impurezas en las muestras con la pérdida del 2.32% y el 2.09%, respectivamente.

8. La muestra identificada como 1N es lapilli de pómez color blanco. La muestra pasa en un 39% el tamiz No. 30, mostrando en su estado natural un tamaño de grano mayor a 0.6 mm. Después de dos horas de molienda, pasa el tamiz No. 325 en un 82.68%, mostrando una fineza menor en comparación a las muestras anteriores. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de 5469 cm²/g y en la prueba de pérdida por ignición se perdió solamente el 1.68%, siendo la muestra que presentó la menor pérdida en comparación con las demás.

9. Las muestras identificadas como 2TF y 2T'G fueron extraídas del mismo banco. La primera es una toba de pómez color beige y la segunda presenta bombas de pómez color blanco. Las muestras pasan el tamiz No. 30 en un 71% y 72.5% (después de la trituración), respectivamente. Después de dos horas de molienda, la muestra 2TF pasa el tamiz No. 325 en un 76.31% y 2T'G pasa el 92.30% mostrando una diferencia entre las muestras. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de 3619 cm²/g para 2TF y de 6368 cm²/g para 2T'G, y en la pérdida por ignición presentaron una porción muy pequeña de impurezas en las muestras con la pérdida del 2.75% y el 2.63%, respectivamente.

10. La muestra identificada como LC es una ceniza de grano grueso con lapilli color blanco. La muestra pasa en un 65.25% el tamiz No. 30, mostrando en su estado natural un tamaño de grano menor a 0.6 mm. Después de dos horas de molienda, pasa el tamiz No. 325 en un 97.23% mostrando una fineza alta. En la prueba de finura Blaine, se obtuvo una superficie específica de 3220 cm²/g y en la prueba de pérdida por ignición se perdió solamente el 2.67% de la muestra ensayada, indicando una fracción muy pequeña de impurezas.

11. La muestra identificada como 1C, es una toba de color beige con incrustaciones de lapilli de pómez color blanco. La muestra pasa el tamiz No. 30 en un 78.5%, indicando que la mayoría del material en su estado natural tiene un tamaño de grano menor a 0.6 mm. Después de dos horas de molienda, pasa el tamiz No. 325 en un 74.86% mostrando una buena fineza. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de 3800 cm²/g y en la prueba de pérdida por ignición se perdió el 2.67% del total de la muestra ensayada, indicando una fracción muy pequeña de impurezas.

12. La muestra identificada como Bar F. es lapilli con presencia de cenizas de pómez color blanco. La muestra pasa el tamiz No. 30 en un 68.13%, indicando que una buena parte del material en su estado natural tiene un tamaño de grano menor a 0.6 mm. Después de dos horas de molienda, pasa el tamiz No. 325 en un 97.59%, mostrando una fineza alta. En la prueba de finura Blaine se obtuvo una superficie específica de 3983 cm²/g y en la prueba de pérdida por ignición se perdió el 1.91% del total de la muestra ensayada, indicando una fracción muy pequeña de impurezas; siendo la segunda muestra con menor pérdida.

13. El material existente en los bancos visitados es puzolana, encontrándose los bancos dentro del área delimitada en el mapa geológico de Guatemala y corroborándose con los resultados de los ensayos mecánicos anteriormente descritos. Estos materiales fueron encontrados en distintas formas debido al tamaño de grano, siendo en su mayoría, tobas volcánicas, bombas, lapillis y cenizas.

RECOMENDACIONES

1. Para una mejor clasificación de las puzolanas se recomienda hacer un estudio mineralógico para conocer los minerales que componen este material y un estudio petrográfico para tener una noción sobre cómo fue la formación de este material; ya que en este trabajo se hace una clasificación a nivel macro, basándose en sus características físicas.
2. Realizar una actualización del Mapa Geológico de Guatemala debido a que en el recorrido realizado se encontraron bancos de puzolana que, según sus coordenadas geográficas, no se encuentran dentro del área identificada como puzolana, delimitada en el mapa y por lo menos dos bancos ya no existen.
3. Se recomienda consultar las normas ASTM para realizar los ensayos con los instrumentos adecuados y hacer una calibración de estos instrumentos antes de realizar dichos ensayos, para obtener datos exactos de las muestras.
4. Utilizar este trabajo como una guía para continuar con la parte de ensayos mecánicos, para evaluar la resistencia de las puzolanas mezcladas con cemento y cal, y de esta forma, realizar nuevamente otra clasificación según sus características de resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRIVILLAGA, Manuel. *Evaluación de bancos de puzolana y calizas en el occidente de Guatemala*. Guatemala: Centro de Investigaciones de Ingeniería, 1993. 19 p.
2. ASTM. *Normas C-618, C-311, C-593, C-204, Cement, Concrete and Concrete Aggregates Committees*. USA: Book of standars, 2009.
3. BOHNENBERGER, Otto. *Los focos eruptivos cuaternarios de Guatemala*. Guatemala: Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, 1969. 75 p.
4. BOHNENBERGER, Otto; BLOUNT, Denis. *Libreto guía de la excursión "A" Guatemala-Salamá-Huehетенango-Guatemala*. Guatemala: Segunda Reunión de Geólogos de América Central, 1966. 20 p.
5. BONIS, Samuel. *Excursion guide book for Guatemala*. Guatemala: Geological Society of America, 1967. 76 p.
6. _____. *A summary of the geology of Guatemala*. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional, 1966. 71 p.
7. Centro de Estudios DE Energía Y Minas. *Apuntes de geología*. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2005. 99 p.

8. DENGO, Gabriel. *Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1968. 52 p.
9. MEYER, Harold. *Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador*. USA: U.S. Geological Survey, 1976. 190 p.
10. MILLER, Randolf. *Potencial de los minerales industriales en Centro América*. USA: U.S. Geological Survey, 1976. 190 p.
11. QUIÑONEZ, Francisco. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. Guatemala: Centro de Investigaciones de Ingeniería, 2010. 95 p.
12. WEYL, Robert. *Geology of Central America*. Inglaterra: Geologisch-Palaontologisches Institut der Universitat GieBen, 1980. 333 p.
13. WILLIAMS, Harold; MCBIRNEY, Armand; DENGO, Gabriel. *Geologic Reconnaissance of Southeastern Guatemala*. USA: University of California Publications in Geological Sciences, 1964. 63 p.

APÉNDICES

MUESTRA IDENTIFICADA COMO SFA

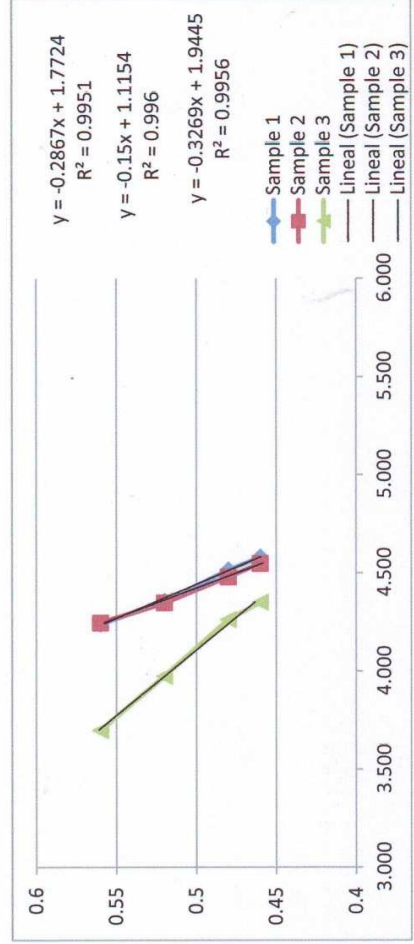
Densidad muestra 2.364 g/cc
Vcelda 1.874 cc

Vcelda nueva 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | √(ε³*t) | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | √(εs³*Ts) | S |
|--------|---------------|----------|------------|---------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------|------|
| 1 | 0.56 | 1.949 | 102.29 | 4.238 | -0.9975 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3115 |
| 1 | 0.52 | 2.126 | 134.77 | 4.353 | -0.9975 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3082 |
| 1 | 0.48 | 2.304 | 184.17 | 4.513 | -0.9975 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3082 |
| 1 | 0.46 | 2.392 | 215.42 | 4.579 | -0.9975 | 1.772 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3073 |
| 2 | 0.56 | 1.949 | 102.55 | 4.244 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3119 |
| 2 | 0.52 | 2.126 | 134.31 | 4.346 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3077 |
| 2 | 0.48 | 2.304 | 181.37 | 4.479 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3059 |
| 2 | 0.46 | 2.392 | 212.37 | 4.547 | -0.9978 | 1.944 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3051 |
| 3 | 0.56 | 1.973 | 77.88 | 3.698 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 2816 |
| 3 | 0.52 | 2.152 | 112.28 | 3.973 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 2914 |
| 3 | 0.48 | 2.332 | 164.10 | 4.260 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3014 |
| 3 | 0.46 | 2.421 | 194.28 | 4.349 | -0.9980 | 1.115 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3023 |

| ε | S promedio por porosidad | S promedio |
|------|--------------------------|------------|
| 0.54 | 3017 | 3036 |
| 0.52 | 3025 | |
| 0.5 | 3052 | |
| 0.48 | 3049 | |

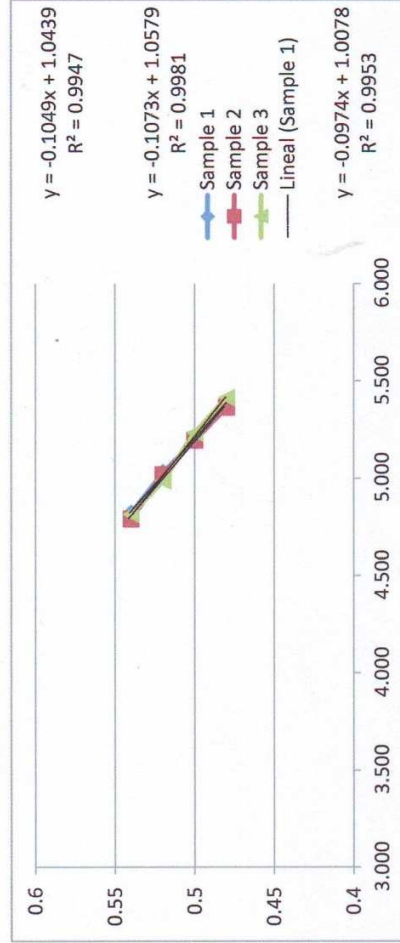
b promedio 1.610



MUESTRA IDENTIFICADA COMO SX1G

Densidad muestra 2.464 g/cc
 Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | √(ε³*tt) | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | √(εs³*Ts) | S |
|--------|---------------|------------|------------|----------|-------------|------------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------|------|
| 1 | 0.54 | 2.150 | 147.5 | 4.819 | -0.9990 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7453 |
| | 0.52 | 2.244 | 179.81 | 5.028 | -0.9990 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7475 |
| 1 | 0.5 | 2.337 | 215.66 | 5.192 | -0.9990 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7430 |
| 1 | 0.48 | 2.431 | 262.19 | 5.385 | -0.9990 | 1.043 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7429 |
| 2 | 0.54 | 2.150 | 145.69 | 4.790 | -0.9973 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7407 |
| 2 | 0.52 | 2.244 | 179.03 | 5.017 | -0.9973 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7458 |
| 2 | 0.5 | 2.337 | 215.87 | 5.195 | -0.9973 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7434 |
| 2 | 0.48 | 2.431 | 260.06 | 5.363 | -0.9973 | 1.057 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7399 |
| 3 | 0.54 | 2.150 | 147.12 | 4.813 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7443 |
| 3 | 0.52 | 2.244 | 176.75 | 4.985 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7411 |
| 3 | 0.5 | 2.337 | 218.94 | 5.231 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7486 |
| 3 | 0.48 | 2.431 | 264.87 | 5.412 | -0.9976 | 1.007 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 7467 |
| ε | S promedio | S promedio | | | | b promedio | | | | | | | |
| 0.54 | 7434 | 7441 | | | | 1.036 | | | | | | | |
| 0.52 | 7448 | | | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 7450 | | | | | | | | | | | | |
| 0.48 | 7431 | | | | | | | | | | | | |



MUESTRA IDENTIFICADA COMO SX2F

Densidad muestra 2.43 g/cc
 Vcelda 1.874 cc

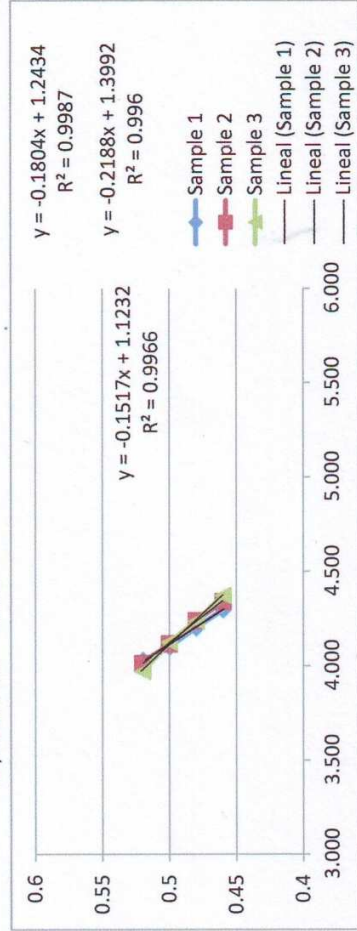
| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon^{3t})}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon s^3 T s)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|--------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------------------------|------|
| 1 | 0.52 | 2.186 | 115.25 | 4.026 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4079 |
| 1 | 0.5 | 2.277 | 134.44 | 4.099 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4044 |
| 1 | 0.48 | 2.368 | 159.5 | 4.200 | -0.9980 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4038 |
| 1 | 0.46 | 2.459 | 189.56 | 4.295 | -0.9980 | 1.243 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4026 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|--------|-------|---------|-------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|
| 2 | 0.52 | 2.186 | 114.40 | 4.011 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4064 |
| 2 | 0.5 | 2.277 | 135.44 | 4.115 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4060 |
| 2 | 0.48 | 2.368 | 162.33 | 4.237 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4073 |
| 2 | 0.46 | 2.459 | 193.41 | 4.339 | -0.9994 | 1.399 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4067 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|--------|-------|---------|-------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|
| 3 | 0.52 | 2.186 | 112.06 | 3.969 | -0.9983 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4022 |
| 3 | 0.5 | 2.277 | 135.97 | 4.123 | -0.9983 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4067 |
| 3 | 0.48 | 2.368 | 162.12 | 4.234 | -0.9983 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4071 |
| 3 | 0.46 | 2.459 | 196.22 | 4.370 | -0.9983 | 1.123 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 4096 |

| ε | S promedio | S promedio |
|------|------------|-------------------------|
| 0.54 | 4055 | 4059 cm ² /g |
| 0.52 | 4057 | |
| 0.5 | 4060 | |
| 0.48 | 4063 | |

b promedio 1.261



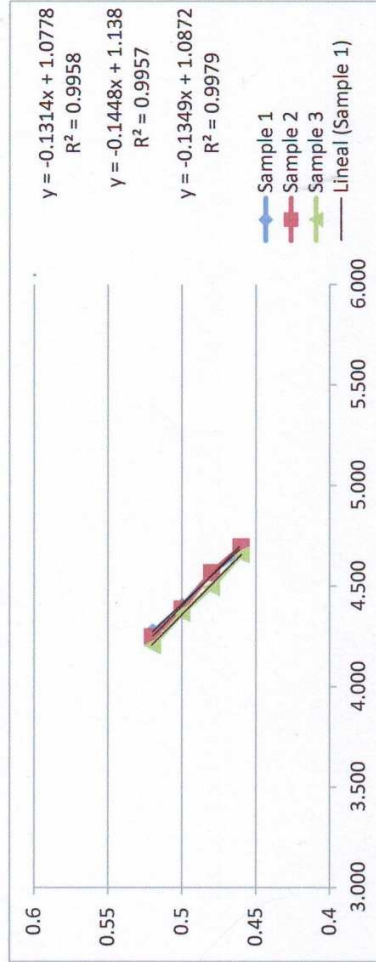
MUESTRA IDENTIFICADA COMO 1N

Densidad muestra 2.522 g/cc Vcelda nueva
 Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon^3 \cdot t)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon s^3 \cdot T s)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|-------------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------------------------------|------|
| 1 | 0.52 | 2.296 | 129.72 | 4.271 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5509 |
| 1 | 0.5 | 2.392 | 154.72 | 4.398 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5484 |
| 1 | 0.48 | 2.488 | 188.1 | 4.561 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5504 |
| 1 | 0.46 | 2.583 | 224.53 | 4.675 | -0.9978 | 1.077 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5466 |
| 2 | 0.52 | 2.296 | 128.37 | 4.249 | -0.9979 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5480 |
| 2 | 0.5 | 2.392 | 153.78 | 4.384 | -0.9979 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5467 |
| 2 | 0.48 | 2.488 | 188.43 | 4.565 | -0.9979 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5509 |
| 2 | 0.46 | 2.583 | 226.32 | 4.694 | -0.9979 | 1.138 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5487 |
| 2 | 0.52 | 2.296 | 125.63 | 4.203 | -0.9989 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5421 |
| 2 | 0.5 | 2.392 | 152.38 | 4.364 | -0.9989 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5442 |
| 2 | 0.48 | 2.488 | 182.44 | 4.492 | -0.9989 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5421 |
| 2 | 0.46 | 2.583 | 222.50 | 4.654 | -0.9989 | 1.087 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 5441 |

| ε | S promedio | S promedio |
|------|------------|------------|
| 0.54 | 5470 | 5469 |
| 0.52 | 5464 | |
| 0.5 | 5478 | |
| 0.48 | 5465 | |

b promedio 1.101



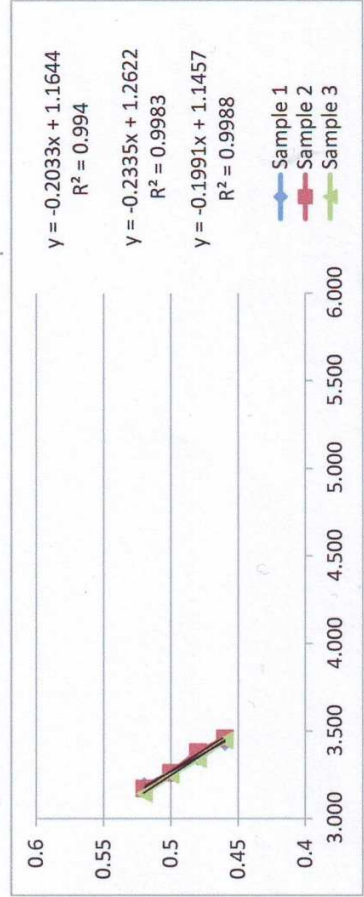
MUESTRA IDENTIFICADA COMO 2TF

Densidad muestra 2.381 g/cc
 Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon_s^*t)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon_s^*Ts)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|--------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|---------------------------|------|
| 1 | 0.52 | 2.168 | 72.06 | 3.183 | -0.9991 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3640 |
| 1 | 0.5 | 2.258 | 84.93 | 3.258 | -0.9991 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3618 |
| 1 | 0.48 | 2.349 | 101.62 | 3.352 | -0.9991 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3618 |
| 1 | 0.46 | 2.439 | 121.35 | 3.437 | -0.9991 | 1.164 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3608 |
| 2 | 0.52 | 2.168 | 71.50 | 3.171 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3626 |
| 2 | 0.5 | 2.258 | 85.06 | 3.261 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3621 |
| 2 | 0.48 | 2.349 | 103.28 | 3.380 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3647 |
| 2 | 0.46 | 2.439 | 122.78 | 3.457 | -0.9970 | 1.262 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3629 |
| 2 | 0.52 | 2.168 | 70.12 | 3.140 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3591 |
| 2 | 0.5 | 2.258 | 84.41 | 3.248 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3607 |
| 2 | 0.48 | 2.349 | 100.78 | 3.338 | -0.9994 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3603 |
| 2 | 0.46 | 2.439 | 121.88 | 3.444 | -0.9994 | 1.145 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3615 |

b promedio 1.190

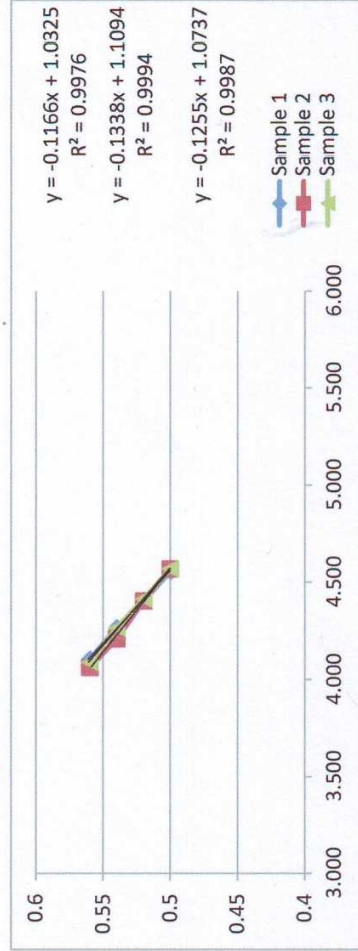
| ε | S promedio por porosidad | S promedio |
|------|--------------------------|------------|
| 0.54 | 3619 | 3619 |
| 0.52 | 3616 | |
| 0.5 | 3623 | |
| 0.48 | 3617 | |



MUESTRA IDENTIFICADA COMO 2T'G

Densidad muestra 2.372 g/cc
Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon^{*}t)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon_s^{*}T_s)}$ | S |
|--------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|-------------|------------|-------|------------------|-----|-----|-------|------------------------------|------|
| 1 | 0.56 | 1.980 | 95.84 | 4.103 | -0.9997 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6393 |
| 1 | 0.54 | 2.070 | 115.41 | 4.263 | -0.9997 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6397 |
| 1 | 0.52 | 2.160 | 137.94 | 4.404 | -0.9997 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6369 |
| 1 | 0.5 | 2.250 | 165.88 | 4.554 | -0.9997 | 1.032 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6354 |
| 2 | 0.56 | 1.980 | 93.90 | 4.061 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6332 |
| 2 | 0.54 | 2.070 | 112.47 | 4.208 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6315 |
| 2 | 0.52 | 2.160 | 137.78 | 4.401 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6365 |
| 2 | 0.5 | 2.250 | 166.85 | 4.567 | -0.9988 | 1.109 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6373 |
| 3 | 0.56 | 1.980 | 95.09 | 4.086 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6372 |
| 3 | 0.54 | 2.070 | 115.41 | 4.263 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6397 |
| 3 | 0.52 | 2.160 | 138.44 | 4.412 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6380 |
| 3 | 0.5 | 2.250 | 166.88 | 4.567 | -0.9993 | 1.073 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 6373 |
| ε | S promedio por porosidad | S promedio | | | | b promedio | 1.071 | | | | | | |
| 0.54 | 6366 | 6368 | | | | | | | | | | | |
| 0.52 | 6369 | | | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 6371 | | | | | | | | | | | | |
| 0.48 | 6367 | | | | | | | | | | | | |



MUESTRA IDENTIFICADA COMO LC

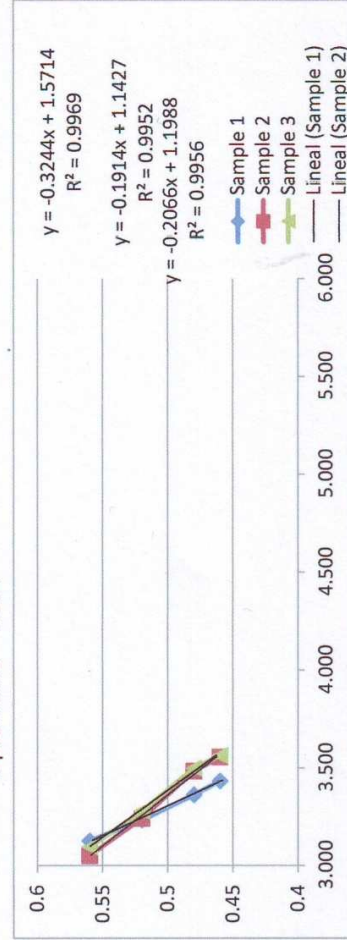
Densidad muestra 2.387 g/cc
 Vcelda 1.874 cc

Vcelda nuevo 1.8967 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon s^3 t)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon s^3 Ts)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|---------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|----------------------------|------|
| 1 | 0.56 | 1.968 | 55.6 | 3.125 | -0.9984 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3210 |
| 1 | 0.52 | 2.147 | 74.3 | 3.232 | -0.9984 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3151 |
| 1 | 0.48 | 2.326 | 102.16 | 3.361 | -0.9984 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3118 |
| 1 | 0.46 | 2.416 | 121.02 | 3.432 | -0.9984 | 1.571 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3108 |
| 2 | 0.56 | 1.968 | 52.96 | 3.050 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3133 |
| 2 | 0.52 | 2.147 | 74.71 | 3.241 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3160 |
| 2 | 0.48 | 2.326 | 109.71 | 3.483 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3231 |
| 2 | 0.46 | 2.416 | 129.80 | 3.554 | -0.9976 | 1.142 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 55.62 | 2.637 | 3219 |
| 3 | 0.56 | 1.992 | 54.50 | 3.094 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3292 |
| 3 | 0.52 | 2.173 | 76.40 | 3.278 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3310 |
| 3 | 0.48 | 2.354 | 110.63 | 3.498 | -0.9978 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3361 |
| 3 | 0.46 | 2.445 | 130.37 | 3.562 | -0.9978 | 1.198 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3342 |

| ε | S promedio |
|------|------------|
| 0.54 | 3212 |
| 0.52 | 3207 |
| 0.5 | 3237 |
| 0.48 | 3223 |

b promedio 1.304



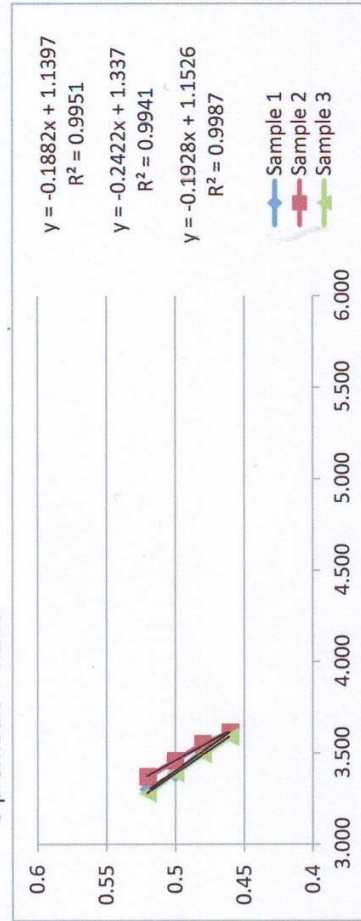
MUESTRA IDENTIFICADA COMO 1C

Densidad muestra 2.395 g/cc
Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (t) | $\sqrt{(\epsilon^3 \cdot t)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon_s^3 \cdot T_s)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|-------------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------------------------------|------|
| 1 | 0.52 | 2.181 | 77.47 | 3.300 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3780 |
| | 0.5 | 2.272 | 91.78 | 3.387 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3770 |
| 1 | 0.48 | 2.363 | 111.66 | 3.514 | -0.9976 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3804 |
| 1 | 0.46 | 2.453 | 133.94 | 3.611 | -0.9976 | 1.139 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3804 |
| 2 | 0.52 | 2.181 | 80.75 | 3.370 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3859 |
| 2 | 0.5 | 2.272 | 95.60 | 3.457 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3848 |
| 2 | 0.48 | 2.363 | 113.90 | 3.549 | -0.9970 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3842 |
| 2 | 0.46 | 2.453 | 134.07 | 3.612 | -0.9970 | 1.337 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3806 |
| 3 | 0.52 | 2.181 | 76.35 | 3.276 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3753 |
| 3 | 0.5 | 2.272 | 91.84 | 3.388 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3771 |
| 3 | 0.48 | 2.363 | 110.28 | 3.492 | -0.9993 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3780 |
| 3 | 0.46 | 2.453 | 132.19 | 3.587 | -0.9993 | 1.152 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3779 |

| ε | S promedio | S promedio |
|------|------------|------------|
| 0.54 | 3797 | 3800 |
| 0.52 | 3796 | cm2/g |
| 0.5 | 3809 | |
| 0.48 | 3797 | |

b promedio 1.209

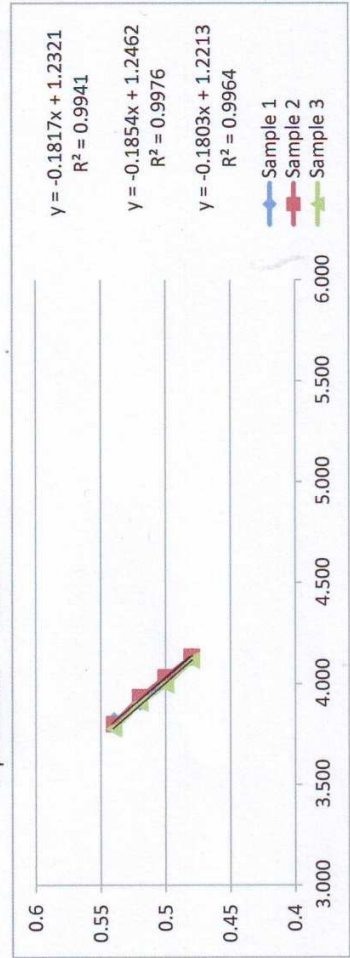


MUESTRA IDENTIFICADA COMO BAR F.

Densidad muestra 2.601 g/cc
Vcelda 1.897 cc

| Sample | Porosidad (ε) | Peso (W) | Tiempo (T) | $\sqrt{(\epsilon^3 \cdot T)}$ | Correlación | b | Ss | Densidad cemento | bs | εs | Ts | $\sqrt{(\epsilon s^3 \cdot T s)}$ | S |
|--------|---------------|----------|------------|-------------------------------|-------------|-------|------|------------------|-----|-----|-------|-----------------------------------|------|
| 1 | 0.54 | 2.270 | 92.44 | 3.815 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 4000 |
| 1 | 0.52 | 2.368 | 108.56 | 3.907 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3982 |
| 1 | 0.5 | 2.467 | 129.53 | 4.024 | -0.9988 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3989 |
| 1 | 0.48 | 2.566 | 154.6 | 4.135 | -0.9988 | 1.232 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3990 |
| 2 | 0.54 | 2.270 | 91.66 | 3.799 | -0.9971 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3984 |
| 2 | 0.52 | 2.368 | 110.00 | 3.933 | -0.9971 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 4008 |
| 2 | 0.5 | 2.467 | 130.00 | 4.031 | -0.9971 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3996 |
| 2 | 0.48 | 2.566 | 154.31 | 4.131 | -0.9971 | 1.246 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3986 |
| 3 | 0.54 | 2.270 | 90.53 | 3.776 | -0.99818132 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3959 |
| 3 | 0.52 | 2.368 | 108.21 | 3.901 | -0.99818132 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3975 |
| 3 | 0.5 | 2.467 | 127.44 | 3.991 | -0.99818132 | | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3957 |
| 3 | 0.48 | 2.566 | 153.03 | 4.114 | -0.99818132 | 1.221 | 3818 | 3.15 | 0.9 | 0.5 | 51.83 | 2.545 | 3970 |

| ε | S promedio | S promedio |
|------|------------|------------|
| 0.54 | 3981 | 3983 |
| 0.52 | 3988 | cm2/g |
| 0.5 | 3981 | |
| 0.48 | 3982 | |





Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
 Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
 MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | |
|----------------------------|---|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil infieri: Víctor Rosales |
| | Ingeniero Civil infieri: Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|---|
| NOMBRE DEL BANCO | San Francisco el Alto (SFA) |
| COORDENADAS | Longitud: W91° 26' 21.8" Latitud: N14° 55' 40.2" |
| ALTITUD (msnm) | 2442 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | |
| Referencia del lugar: | Km. 187.13 cerca de la entrada a la población de San Francisco el Alto. |
| | |
| | |
| | |

| |
|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: |
| |
| |
| |
| |

| | |
|----------------------|---|
| OTRAS OBSERVACIONES: | Aproximadamente a 6 m. del suelo una Franja de color rosado de aproximadamente 3 m. de espesor. |
| | |
| | |
| | |



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
 Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
 MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: | Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil infieri: | Víctor Rosales |
| | Ingeniero Civil infieri: | Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|--|
| NOMBRE DEL BANCO | Salcajá / Xela (SX1 y SX2) |
| COORDENADAS | Longitud: W91° 28' 20.4" Latitud: N14° 51' 37.5" |
| ALTITUD (msnm) | 2350 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | |
| Referencia del lugar: | Bloquera San Francisco y gasolinera Santiago. |
| | |
| | |
| | |

| | |
|--|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: | |
| | |
| | |
| | |
| | |

| | |
|----------------------|--|
| OTRAS OBSERVACIONES: | Banco con cenizas que incluyen cenizas bombas y bloques de pómez, los espesores visibles aproximados son de 15 metros. La capa vegetal superficial es muy pequeña. El material ha sido bastante explotado y se ha utilizado en la construcción de carreteras y bases de pisos de viviendas y edificios. Se observan muchas colinas a los alrededores del mismo material. |
|----------------------|--|



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: | Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil infieri: | Víctor Rosales |
| | Ingeniero Civil infieri: | Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|---|
| NOMBRE DEL BANCO | Nahualá (1N) |
| COORDENADAS | Longitud: W91° 19' 51" Latitud: N14° 50' 2.2" |
| ALTITUD (msnm) | 2496 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | J 270-275, L53 |
| Referencia del lugar: | Km. 160 |
| | |
| | |
| | |

| |
|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: |
| |
| |
| |
| |

| | |
|----------------------|---|
| OTRAS OBSERVACIONES: | Tefra de lapilli de pómez (arena) color blanco de aproximadamente 2 m. de espesor, colocada por debajo de capas alternas de pómez y paleosuelo de 6 m. de espesor, debajo de pómez subyacen capas de sedimentos de pómez con estructura laminar horizontal. |
|----------------------|---|



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
 Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
 MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: | Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil Infiere: | Víctor Rosales |
| | Ingeniero Civil Infiere: | Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|--|
| NOMBRE DEL BANCO | Tecpán (2T y 2T') |
| COORDENADAS | Longitud: W90° 58' 32.8" Latitud: N14° 45' 23.7" |
| ALTITUD (msnm) | 2347 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | J 279-282 |
| Referencia del lugar: | Km.86.3 |
| | |
| | |
| | |

| |
|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: |
| |
| |
| |
| |

| | |
|----------------------|---|
| OTRAS OBSERVACIONES: | Hay pómez lapilli desde cenizas hasta bombas, con una altura visible de 40 m. |
| | |
| | |
| | |



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
 Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
 MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: | Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil infieri: | Victor Rosales |
| | Ingeniero Civil infieri: | Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|--|
| NOMBRE DEL BANCO | La Canoa (LC) |
| COORDENADAS | Longitud: W90° 58' 17.7" Latitud: N14° 39' 34.2" |
| ALTITUD (msnm) | 2099 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | |
| Referencia del lugar: | Km. 76+750 carretera a Patzún |
| | |
| | |
| | |

| | |
|--|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: | |
| | |
| | |
| | |
| | |

| | |
|----------------------|---|
| OTRAS OBSERVACIONES: | A nivel del suelo hay una capa rosada aproximadamente de 2m. de espesor, sobre ella, una capa de lapilli de mediana a fina de 10 m. de espesor. |
| | |
| | |



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
 Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología
 Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología



EXPLORACIÓN BANCOS DE PUZOLANA
 MARZO 2011



FECHA: 23 de marzo de 2011

| | | |
|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| NOMBRE DE LOS EXPLORADORES | Ingeniero Civil: | Javier Quiñonez |
| | Ingeniero Civil inferi: | Víctor Rosales |
| | Ingeniero Civil inferi: | Luis Ochoa |

| | |
|-----------------------|---|
| NOMBRE DEL BANCO | Comalapa (1C) |
| COORDENADAS | Longitud: W90° 54' 6.8" Latitud: N14° 41' 57.9" |
| ALTITUD (msnm) | 2046 |
| No. DE FOTOGRAFÍAS | |
| Referencia del lugar: | Km. 74+800 |
| | |
| | |
| | |

| |
|--|
| OBSERVACIONES RESPECTO DEL MAPA GEOLÓGICO: |
| |
| |
| |
| |

| |
|---|
| OTRAS OBSERVACIONES: |
| Banco de cenizas y arenas de pómez con |
| Espesores visibles de aproximadamente de 8 metros. Existe abundante |
| material en los alrededores de la zona donde fue tomada la muestra. |
| También existe abundante vegetación y bosque sobre estos materiales. La |
| capa vegetal superficial es de aproximadamente 30 cms. por debajo de la |
| cual se observan limos de color café, de aproximadamente 1 metro. |

Tabla 1. **La densidad del Mercurio, viscosidad del aire (η) y $\sqrt{\eta}$ en determinadas temperaturas**

| Room Temperature, °C | Density of Mercury, Mg/m ³ | Viscosity of Air, η μ Pa·s | $\sqrt{\eta}$ |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| 18 | 13.55 | 17.98 | 4.24 |
| 20 | 13.55 | 18.08 | 4.25 |
| 22 | 13.54 | 18.18 | 4.26 |
| 24 | 13.54 | 18.28 | 4.28 |
| 26 | 13.53 | 18.37 | 4.29 |
| 28 | 13.53 | 18.47 | 4.30 |
| 30 | 13.52 | 18.57 | 4.31 |
| 32 | 13.52 | 18.67 | 4.32 |
| 34 | 13.51 | 18.76 | 4.33 |

Fuente: ASTM. Norma C 204-11

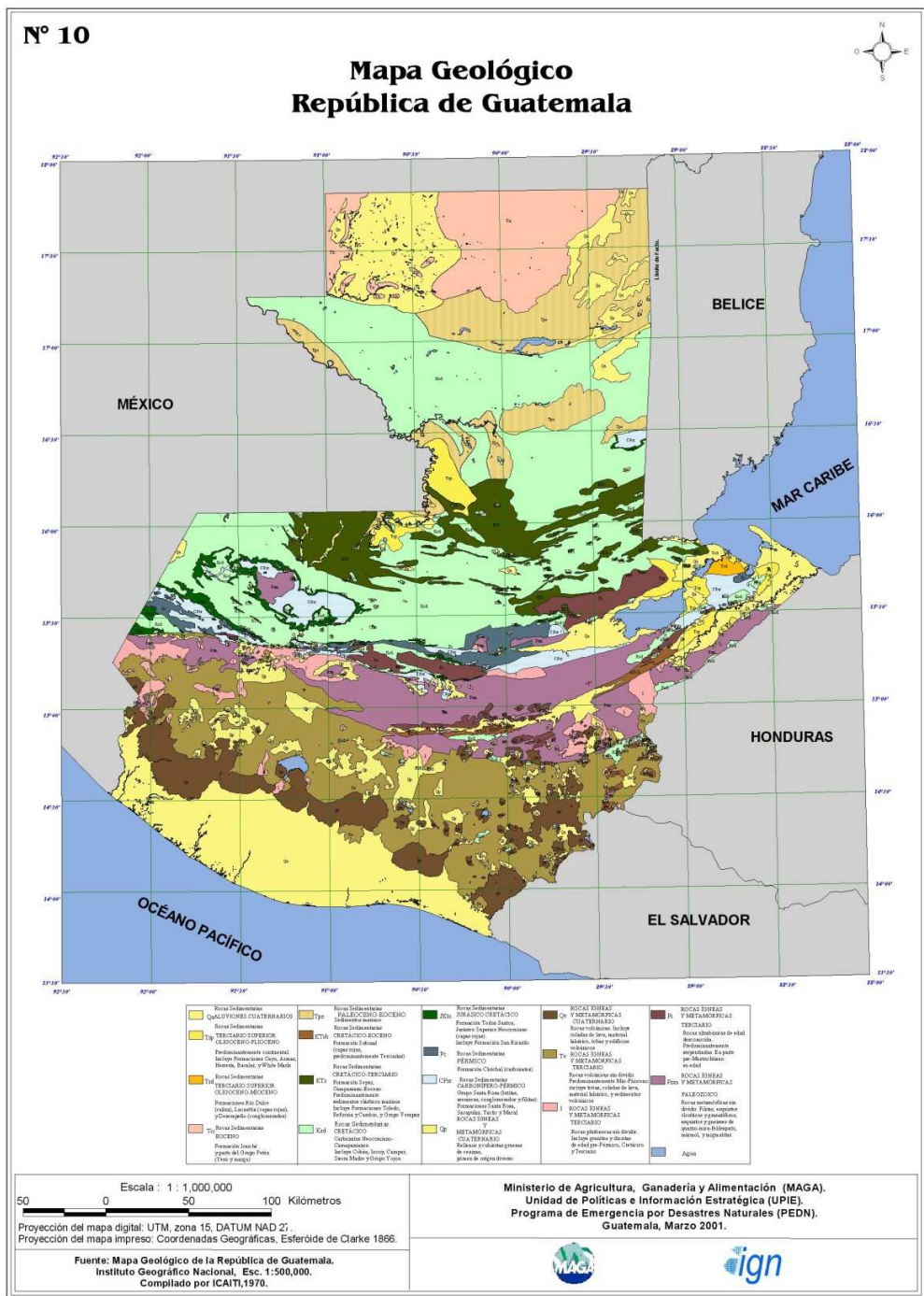
Tabla 3. Tiempo de flujo de aire

T= tiempo de flujo de aire en segundos; \sqrt{T} = factor para usar en las ecuaciones

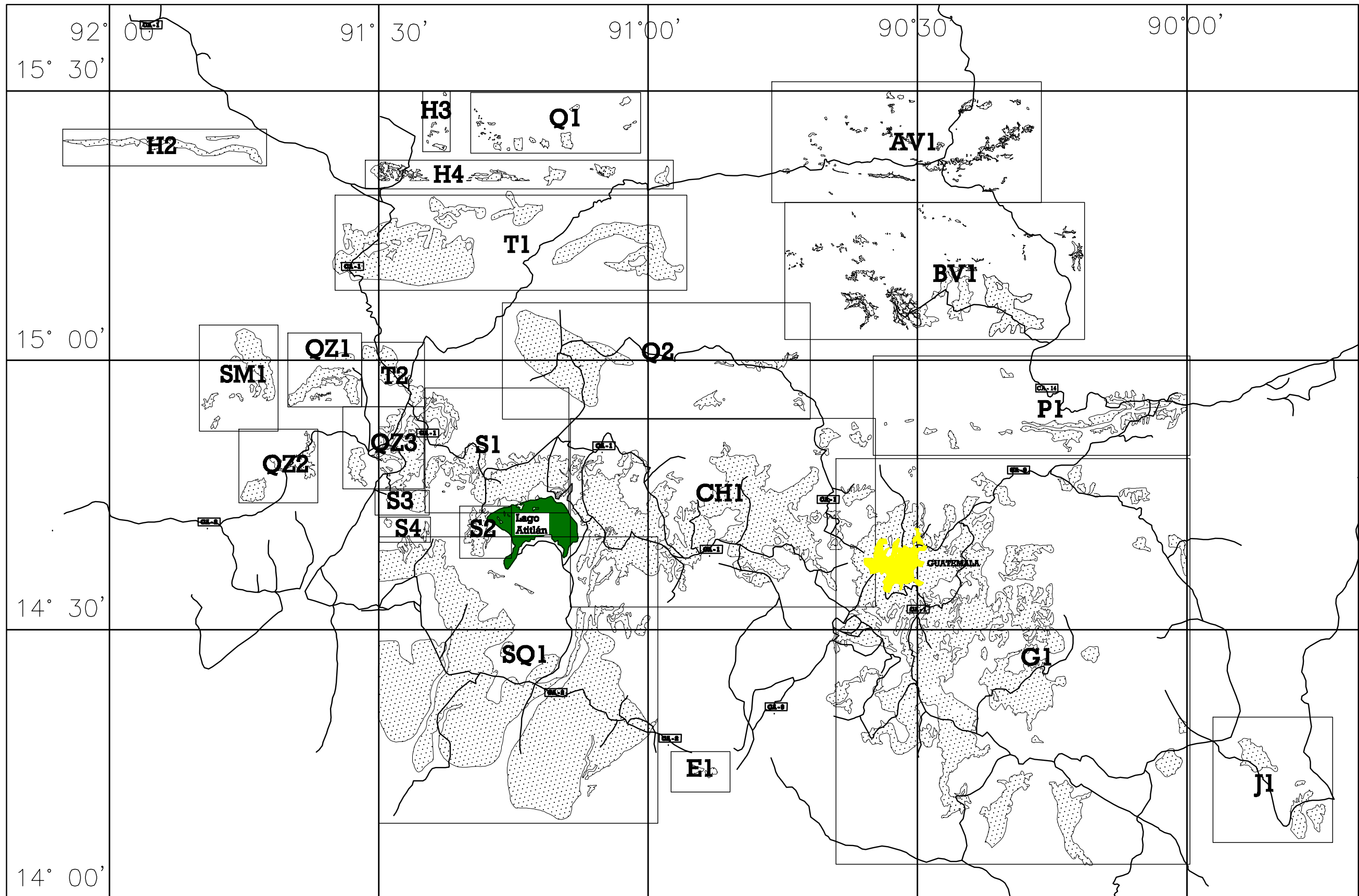
| T | \sqrt{T} | T | \sqrt{T} | T | \sqrt{T} | T | \sqrt{T} | T | \sqrt{T} | T | \sqrt{T} |
|-----|------------|-----|------------|------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|
| 26 | 5.10 | 51 | 7.14 | 76 | 8.72 | 101 | 10.05 | 151 | 12.29 | 201 | 14.18 |
| 26½ | 5.15 | 51½ | 7.18 | 76½ | 8.75 | 102 | 10.10 | 152 | 12.33 | 202 | 14.21 |
| 27 | 5.20 | 52 | 7.21 | 77 | 8.77 | 103 | 10.15 | 153 | 12.37 | 203 | 14.25 |
| 27½ | 5.24 | 52½ | 7.25 | 77½ | 8.80 | 104 | 10.20 | 154 | 12.41 | 204 | 14.28 |
| 28 | 5.29 | 53 | 7.28 | 78 | 8.83 | 105 | 10.25 | 155 | 12.45 | 205 | 14.32 |
| 28½ | 5.34 | 53½ | 7.31 | 78½ | 8.86 | 106 | 10.30 | 156 | 12.49 | 206 | 14.35 |
| 29 | 5.39 | 54 | 7.35 | 79 | 8.89 | 107 | 10.34 | 157 | 12.53 | 207 | 14.39 |
| 29½ | 5.43 | 54½ | 7.38 | 79½ | 8.92 | 108 | 10.39 | 158 | 12.57 | 208 | 14.42 |
| 30 | 5.48 | 55 | 7.42 | 80 | 8.94 | 109 | 10.44 | 159 | 12.61 | 209 | 14.46 |
| 30½ | 5.52 | 55½ | 7.45 | 80½ | 8.97 | 110 | 10.49 | 160 | 12.65 | 210 | 14.49 |
| 31 | 5.57 | 56 | 7.48 | 81 | 9.00 | 111 | 10.54 | 161 | 12.69 | 211 | 14.53 |
| 31½ | 5.61 | 56½ | 7.52 | 81½ | 9.03 | 112 | 10.58 | 162 | 12.73 | 212 | 14.56 |
| 32 | 5.66 | 57 | 7.55 | 82 | 9.06 | 113 | 10.63 | 163 | 12.77 | 213 | 14.59 |
| 32½ | 5.70 | 57½ | 7.58 | 82½ | 9.08 | 114 | 10.68 | 164 | 12.81 | 214 | 14.63 |
| 33 | 5.74 | 58 | 7.62 | 83 | 9.11 | 115 | 10.72 | 165 | 12.85 | 215 | 14.66 |
| 33½ | 5.79 | 58½ | 7.65 | 83½ | 9.14 | 116 | 10.77 | 166 | 12.88 | 216 | 14.70 |
| 34 | 5.83 | 59 | 7.68 | 84 | 9.17 | 117 | 10.82 | 167 | 12.92 | 217 | 14.73 |
| 34½ | 5.87 | 59½ | 7.71 | 84½ | 9.19 | 118 | 10.86 | 168 | 12.96 | 218 | 14.76 |
| 35 | 5.92 | 60 | 7.75 | 85 | 9.22 | 119 | 10.91 | 169 | 13.00 | 219 | 14.80 |
| 35½ | 5.96 | 60½ | 7.78 | 85½ | 9.25 | 120 | 10.95 | 170 | 13.04 | 220 | 14.83 |
| 36 | 6.00 | 61 | 7.81 | 86 | 9.27 | 121 | 11.00 | 171 | 13.08 | 222 | 14.90 |
| 36½ | 6.04 | 61½ | 7.84 | 86½ | 9.30 | 122 | 11.05 | 172 | 13.11 | 224 | 14.97 |
| 37 | 6.08 | 62 | 7.87 | 87 | 9.33 | 123 | 11.09 | 173 | 13.15 | 226 | 15.03 |
| 37½ | 6.12 | 62½ | 7.91 | 87½ | 9.35 | 124 | 11.14 | 174 | 13.19 | 228 | 15.10 |
| 38 | 6.16 | 63 | 7.94 | 88 | 9.38 | 125 | 11.18 | 175 | 13.23 | 230 | 15.17 |
| 38½ | 6.20 | 63½ | 7.97 | 88½ | 9.41 | 126 | 11.22 | 176 | 13.27 | 232 | 15.23 |
| 39 | 6.24 | 64 | 8.00 | 89 | 9.43 | 127 | 11.27 | 177 | 13.30 | 234 | 15.30 |
| 39½ | 6.28 | 64½ | 8.03 | 89½ | 9.46 | 128 | 11.31 | 178 | 13.34 | 236 | 15.36 |
| 40 | 6.32 | 65 | 8.06 | 90 | 9.49 | 129 | 11.36 | 179 | 13.38 | 238 | 15.43 |
| 40½ | 6.36 | 65½ | 8.09 | 90½ | 9.51 | 130 | 11.40 | 180 | 13.42 | 240 | 15.49 |
| 41 | 6.40 | 66 | 8.12 | 91 | 9.54 | 131 | 11.45 | 181 | 13.45 | 242 | 15.56 |
| 41½ | 6.44 | 66½ | 8.15 | 91½ | 9.57 | 132 | 11.49 | 182 | 13.49 | 244 | 15.62 |
| 42 | 6.48 | 67 | 8.19 | 92 | 9.59 | 133 | 11.53 | 183 | 13.53 | 246 | 15.68 |
| 42½ | 6.52 | 67½ | 8.22 | 92½ | 9.62 | 134 | 11.58 | 184 | 13.56 | 248 | 15.75 |
| 43 | 6.56 | 68 | 8.25 | 93 | 9.64 | 135 | 11.62 | 185 | 13.60 | 250 | 15.81 |
| 43½ | 6.60 | 68½ | 8.28 | 93½ | 9.67 | 136 | 11.66 | 186 | 13.64 | 252 | 15.87 |
| 44 | 6.63 | 69 | 8.31 | 94 | 9.70 | 137 | 11.70 | 187 | 13.67 | 254 | 15.94 |
| 44½ | 6.67 | 69½ | 8.34 | 94½ | 9.72 | 138 | 11.75 | 188 | 13.71 | 256 | 16.00 |
| 45 | 6.71 | 70 | 8.37 | 95 | 9.75 | 139 | 11.79 | 189 | 13.75 | 258 | 16.06 |
| 45½ | 6.75 | 70½ | 8.40 | 95½ | 9.77 | 140 | 11.83 | 190 | 13.78 | 260 | 16.12 |
| 46 | 6.78 | 71 | 8.43 | 96 | 9.80 | 141 | 11.87 | 191 | 13.82 | 262 | 16.19 |
| 46½ | 6.82 | 71½ | 8.46 | 96½ | 9.82 | 142 | 11.92 | 192 | 13.86 | 264 | 16.25 |
| 47 | 6.86 | 72 | 8.49 | 97 | 9.85 | 143 | 11.96 | 193 | 13.89 | 266 | 16.31 |
| 47½ | 6.89 | 72½ | 8.51 | | 9.87 | 144 | 12.00 | 194 | 13.93 | 268 | 16.37 |
| 48 | 6.93 | 73 | 8.54 | | 9.90 | 145 | 12.04 | 195 | 13.96 | 270 | 16.43 |
| 48½ | 6.96 | 73½ | 8.57 | 98½ | 9.92 | 146 | 12.08 | 196 | 14.00 | 272 | 16.49 |
| 49 | 7.00 | 74 | 8.60 | 99 | 9.95 | 147 | 12.12 | 197 | 14.04 | 274 | 16.55 |
| 49½ | 7.04 | 74½ | 8.63 | 99½ | 9.97 | 148 | 12.17 | 198 | 14.07 | 276 | 16.61 |
| 50 | 7.07 | 75 | 8.66 | 100 | 10.00 | 149 | 12.21 | 199 | 14.11 | 278 | 16.67 |
| 50½ | 7.11 | 75½ | 8.69 | 100½ | 10.02 | 150 | 12.25 | 200 | 14.14 | 280 | 16.73 |

Fuente: ASTM. Norma C 204-11

MAPA GEOLÓGICO DE GUATEMALA



Fuente: Instituto Geográfico Nacional

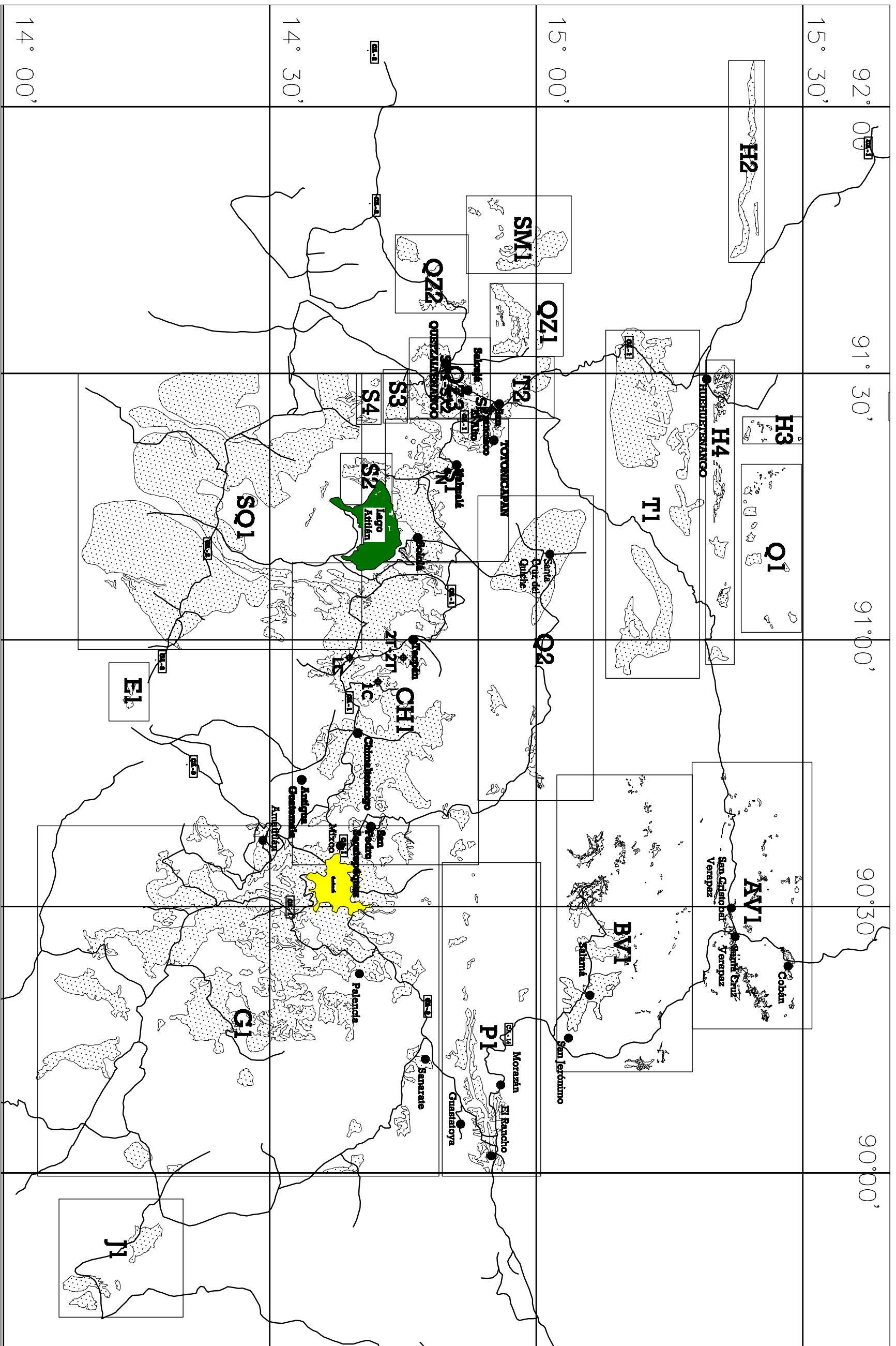


ESCALA: 1:775,000

IDENTIFICACIÓN MUESTRAS DE MATERIAL PUZOLANICO

FECHA: OCTUBRE, 2011

DIBUJO: LUIS OCHOA

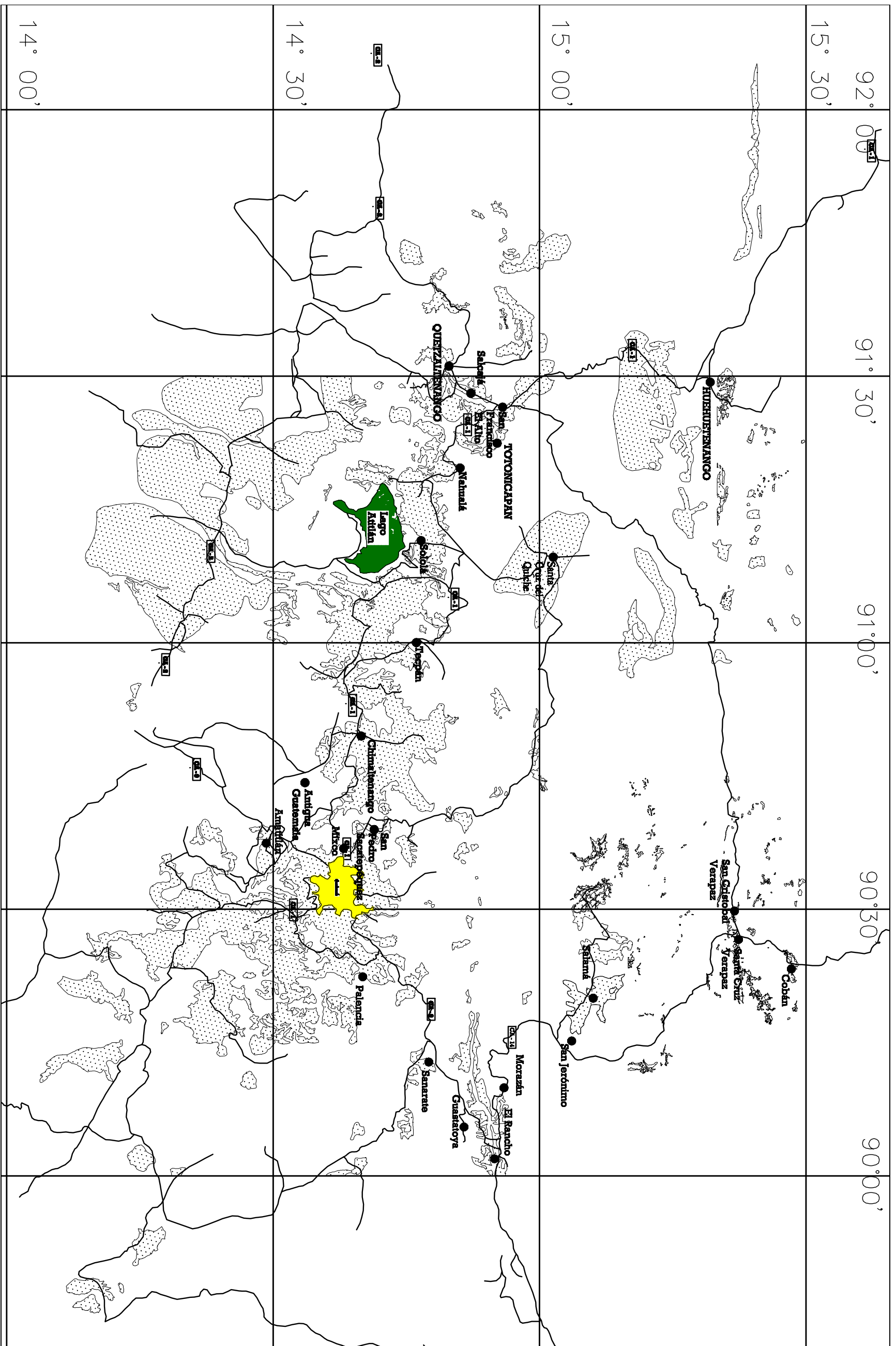


UBICACIÓN MUESTRAS EN MATERIAL
PUZOLANICO

ESCALA: 1:775,000

DIBUJO: LUIS OCHOA

FECHA: OCTUBRE, 2011



UBICACIÓN AREAS Qp

ESCALA: 1:775,000

DIBUJO: LUIS OCHOA

FECHA: OCTUBRE, 2011