



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

TRABAJO TERMINAL DE GRADO

***CARACTERIZACIÓN DE ADOBE REFORZADO CON FIBRA DE BAGAZO DE  
AGAVE Y CENIZA COMO ESTABILIZADOR. MATERIAL CONSTRUCTIVO  
SUSTENTABLE.***

QUE PRESENTA  
MTRO. MAURICIO RUIZ SERRANO

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN DISEÑO

DIRECTOR:  
DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS  
TUTORES ADJUNTOS:  
DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNANDEZ  
DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN



TOLUCA, MÉXICO, AGOSTO 2023



## RESUMEN

El adobe es una técnica constructiva de arcilla que se ha utilizado desde hace siglos en diferentes regiones del mundo, especialmente en zonas áridas y semidesérticas. El uso de adobe en la arquitectura ha evolucionado a lo largo del tiempo, y en la actualidad se combinan técnicas tradicionales con materiales modernos para mejorar la durabilidad y la resistencia estructural de las construcciones de tierra. Así mismo, se han empezado a utilizar subproductos residuales de origen vegetal en el ramo de la construcción, aportando así beneficios mecánicos, económicos y ambientales. El enfoque teórico de esta investigación comprende a la sustentabilidad, la economía circular y el análisis de ciclo de vida de un producto.

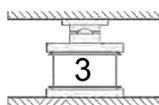
El objetivo principal de este proyecto consistió en diseñar un biocomposito para la industria de la construcción a partir de fibras de bagazo de agave (*angustifolia haw*) y ceniza como estabilizador. Posteriormente se realizó el estudio de caracterización de las propiedades físico-mecánicas y químicas de diferentes muestras derivadas de la composición original de adobe procedentes de Santa María la Asunción, Zumpahuacán, Estado de México. Las pruebas realizadas a dichas muestras fueron las siguientes: longitud, peso, humedad, granulometría, peso volumétrico, prueba Proctor, plasticidad, densidad de sólidos, colorimetría, difracción de rayos x, resistividad eléctrica, absorción, potencial de hidrogeno, microscopía de barrido y compresión simple.

Los resultados de caracterización demostraron que las arenas, arcillas y cenizas cumplen con las condiciones óptimas en materia de color, densidad, composición química, granulometría, pH y compacidad para elaborar adobes de calidad.

Un aspecto relevante de esta investigación es el análisis del comportamiento mecánico de los bloques de adobe a cargas verticales, en especial las pruebas de esfuerzo a compresión simple. La composición de adobe con bagazo y ceniza presentó mejores resultados en materia de esfuerzo a la compresión, ligereza y plasticidad versus las demás muestras.

La reutilización de materiales de desecho en la construcción, como el adobe, ofrece una serie de beneficios en términos materiales, culturales, sociales, económicos y ambientales. Al emplear técnicas tradicionales y aprovechar los recursos disponibles localmente, se promueve la preservación del patrimonio.

Palabras clave: adobe, bagazo, construcción, sustentabilidad.



## ABSTRACT

Adobe is a clay construction technique that has been used for centuries in different regions of the world, especially in arid and semiarid areas. The use of adobe in architecture has evolved over time, and nowadays traditional techniques are combined with modern materials to improve the durability and structural resistance of earth constructions. In addition, residual by-products of vegetable origin have been introduced in the construction field, providing mechanical, economic, and environmental benefits. The theoretical approach of this research includes sustainability, circular economy and life cycle assessment of a product.

The main objective of this project was to design a biocomposite for the construction industry using fibers from agave bagasse (*angustifolia haw*) and ash as a stabilizer. Subsequently, a characterization study was conducted on the physical-mechanical and chemical properties of different samples derived from the original composition of adobe from Santa Maria la Asunción, Zumpahuacán, State of Mexico. The tests performed on these samples included: length, weight, moisture, particle size distribution, bulk density, Proctor test, plasticity, solid density, colorimetry, X-ray diffraction, electrical resistivity, absorption, pH, scanning microscopy and uniaxial compression.

The characterization evidence showed that the sands, clays, and ashes met the optimal conditions in terms of color, density, chemical composition, particle size, pH, and compactness to produce high-quality adobes.

A significant test in this research is the mechanical behavior analysis of adobe bricks under vertical loads, the simple compression stress analysis. The composition of adobe with bagasse and ash showed better results in terms of compression stress, lightweight, and plasticity compared to the other samples.

The reuse of waste materials in construction, such as adobe, offers a range of benefits in terms of resources, culture, society, economics, and environment. Applying traditional techniques and taking advantage of locally available resources promotes the preservation of cultural heritage.

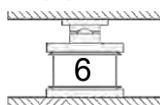
Key words: adobe, bagasse, construction, sustainability.



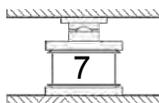
## ÍNDICE

RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
I. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	11
1.3 HIPOTESIS .....	13
1.4 OBJETIVOS .....	13
II. MARCO CONCEPTUAL .....	14
2.1 ARQUITECTURA DE TIERRA .....	14
2.1.1 EL ADOBE .....	15
2.1.2 FIBRAS NATURALES .....	18
2.1.2.1 FIBRAS DE AGAVE .....	19
2.1.3 ADOBE ADICIONADO CON FIBRAS NATURALES .....	21
2.1.4 ESTABILIZADORES .....	22
2.1.4.1 CENIZAS .....	23
2.1.4.1.1 CENIZAS DE BAGAZO DE AGAVE .....	24
2.2 VIVIENDA RURAL .....	25
III. MARCO TEÓRICO .....	27
3.1 SUSTENTABILIDAD .....	27
3.1.1 PERSPECTIVA ECONOMICA .....	29
3.1.1.1 ECONOMÍA CIRCULAR .....	29
3.1.2 PERSPECTIVA AMBIENTAL .....	31
3.1.2.1 BIOCONSTRUCCIÓN .....	31
3.1.3 PERSPECTIVA SOCIAL .....	32
3.1.3.1 PATRIMONIO CULTURAL .....	32
3.1.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	35
IV. MARCO REFERENCIAL .....	36
4.1 ADOBE EN EL ESTADO DE MÉXICO .....	36
4.2 ZUMPAHUACÁN, ESTADO DE MÉXICO .....	36
4.2.1 TOPOGRAFÍA .....	37
4.2.2 CLIMA .....	39
4.2.3 DEMOGRAFÍA .....	41
4.2.4 ACTIVIDADES ECONÓMICAS .....	41
4.2.5 ADOBE EN LA REGIÓN .....	42
4.2.6 AGAVE EN LA REGIÓN .....	45
4.2.7 SANTA MARÍA LA ASUNCIÓN .....	49
V. MARCO NORMATIVO .....	51

5.1 NORMAS MEXICANAS DE CONSTRUCCIÓN.....	51
5.2 NORMAS INTERNACIONALES DE CONSTRUCCIÓN .....	52
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.....	55
6.1.1 BAGAZO DE AGAVE (ANGUSTIFOLIA HAW).....	56
6.1.1.1 PESO Y TAMAÑO .....	57
6.1.1.2 MICROSCOPIA DE BARRIDO .....	57
6.2 CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDOS.....	58
6.2.1 POTENCIAL HIDRÓGENO .....	58
6.3 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS .....	59
6.3.1 TIPOS DE SUELOS.....	61
6.3.2 PROPIEDADES NATURALES .....	63
6.3.3 GRANULOMETRÍA.....	65
6.3.4 LÍMITES DE PLASTICIDAD .....	69
6.3.5 PESO VOLUMÉTRICO.....	73
6.3.6 PRUEBA PROCTOR .....	75
6.3.7 COMPRESIÓN SIMPLE .....	78
6.3.8 DENSIDAD DE SOLIDOS .....	79
6.3.9 COLORIMETRÍA.....	81
6.3.10 FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	84
6.3.11 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	84
6.3.12 MICROSCOPIA DE BARRIDO .....	85
6.4 ENSAYO DE ADOBES MUESTRA.....	85
6.4.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE .....	87
6.4.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	89
6.4.3 CAPACIDAD DE ABSORCIÓN .....	90
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
7.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.....	92
7.1.1 PESO Y TAMAÑO .....	92
7.1.2 MICROSCOPIA DE BARRIDO .....	92
7.2 CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDOS.....	92
7.2.1 POTENCIAL HIDRÓGENO .....	93
7.3 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS .....	93
7.3.1 PROPIEDADES NATURALES .....	93
7.3.2 GRANULOMETRÍA.....	94
7.3.3 LÍMITES DE PLASTICIDAD .....	99
7.3.4 PESO VOLUMÉTRICO.....	103
7.3.5 PRUEBA PROCTOR .....	104
7.3.6 COMPRESIÓN SIMPLE .....	107
7.3.7 DENSIDAD DE SOLIDOS .....	109
7.3.8 COLORIMETRÍA.....	110
7.3.9 FLUORESCENCIA DE RAYOS X .....	111



7.3.10 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	113
7.3.11 MICROSCOPIA DE BARRIDO .....	114
7.4 ENSAYO DE ADOBES MUESTRA.....	116
7.4.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE .....	116
7.4.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	118
7.4.3 CAPACIDAD DE ABSORCIÓN .....	118
7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES .....	119
7.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	119
VIII. CONCLUSIONES .....	123
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	125
X. ANEXOS .....	135



## I. INTRODUCCIÓN

El ser humano se ha ocupado por su protección, resguardo y alimentación desde su inicio. El presente trabajo de investigación, indagó sobre la construcción hecha con adobe crudo tomando en consideración dos objetos de análisis: al adobe como material de construcción y la vivienda rural, cruzados por un eje transversal: la sustentabilidad. Particularmente, en el ámbito constructivo puede ser trascendental la reutilización de materiales de desecho generando beneficios ambientales, sociales, culturales, patrimoniales y particularmente económicos.

El patrimonio arquitectónico de tierra, particularmente el espacio doméstico, es complejo por la red de representaciones simbólicas generadas entre el contexto interior y los habitantes. Habrá que comprender y tener acceso a las normas que rigen la conducta individual y las prácticas colectivas (Serrano-Barquín, y otros, 2020). Por ello, las actividades alrededor de una vivienda, comprenden diversos significados.

Para favorecer las técnicas exitosas de un desarrollo constructivo sustentable la investigación y el conocimiento son imprescindibles, por otro lado, habrá que considerar a la comunidad y sus saberes, así como reflexionar que la identidad cultural podría ser la mayor motivación para construir de manera sustentable, satisfactoria y posible. Desde un sentimiento de pertenencia es posible el ejercicio de la vida en cotidiana; según Domingo (2015) se pueden caracterizar como: variable; emprendedora y múltiple, que sea una identidad cosmopolita, cívica, en pocas palabras una identidad cultural, que se forma a lo largo de la vida. Asimismo, existen diversos tipos de patrimonio, el cultural, según Muriel (2016) posiblemente, tiene su origen en la Revolución Francesa, como una respuesta a la agitación revolucionaria y a una consciencia del acontecer histórico que se ha ido consolidando desde el periodo denominado: Ilustración. Aunque hay quienes dicen es intemporal, como pulsión humana por preservar y aferrarse a lo efímero.

El bien cultural, fundamental en la lógica de la patrimonialización de aspectos socioculturales de un colectivo, abría la posibilidad de materializar elementos simbólicos al mismo tiempo que hacía simbólicos los elementos materiales, es formulado inicialmente en 1954 durante la Convención de la Haya (Muriel, 2016:182).

La vivienda es un espacio que busca ofrecer confort y bienestar a sus habitantes, ante ello, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), han reconocido: que todo ser humano necesita de un entorno digno, que le ayude a su crecimiento integral, mental, físico y psicológico. Conforme a Barba (2015), para el ser humano es el espacio más importante, ya que allí, realiza diversas actividades

que les son de gran significado. Es así que, este espacio vivencial debe proveer habitabilidad, sustentabilidad, confort y salubridad.

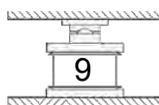
Las prácticas constructivas en nuestro planeta son tan diversas como las formas de interacción humana; en ellas se imprimen valores, costumbres, formas de actuar y de concebir la vida. El contexto económico, social, político y cultural de cada país determina la producción del conocimiento para la construcción de viviendas y edificaciones públicas y privadas (Serrano y Flores, 2020). En este sentido, la sociedad espera que sus instituciones constructivas o sus técnicos de obras contribuyan en la mayor medida de lo posible a generar propuestas y alternativas reales a los problemas que enfrenta, sin embargo, se ha llegado a la homogeneización arquitectónica, tales como: tener una vivienda impersonal, masificada, insensible y además más costosa por el uso del block y el concreto. Lo cual restringe la posibilidad de la conservación del patrimonio arquitectónico de tierra.

Es quizá, el momento de confirmar que los problemas actuales son substancialmente complejos porque ya no es posible delimitar su análisis a una sola mirada. Los nuevos estilos de pensamiento que se vinculan entre sí para abordar la vida humana (su vivienda y calidad de vida) y social (su poblado, el urbanismo), se verán integradas al patrimonio cultural, del que deriva el arquitectónico. Como señala Morin (2014): “la experiencia humana ha de ser, multifacética; la mente humana no coexiste sin tradiciones familiares, étnicas, sociales, etarias y raciales; es decir, todo aquello que llamamos cultura, se proyecta. Paradójicamente, mientras más se conoce de ella, existe mayor proximidad al enfoque reduccionista que restringe la experiencia a sectores cortos del saber”.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La arquitectura de tierra que ha estado presente desde años inmemorables y que ha demostrado los beneficios y bondades en costos económicos y ambientales, presenta una problemática muy fuerte que es la imposición en el uso de materiales de construcción muy contaminantes. De acuerdo con Cedeño (2010), es imperante promover materiales y técnicas de construcción que garanticen mejores condiciones de habitabilidad y la preservación del ambiente, además, que conserven la imagen tradicional de los poblados.

La degradación del ambiente derivada de la manufactura de materiales de construcción complejos es uno de los retos ecológicos de nuestra era. La producción de estos materiales requiere de una quema de combustibles que la vuelven una de las industrias con los mayores índices de consumo de energía y emisión de gases contaminantes. Entre los gases de efecto invernadero generados en la cocción se



encuentran: a) óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>) b) compuestos de nitrógeno (NO, NH<sub>3</sub>) c) compuestos de azufre (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) d) compuestos orgánicos de carbono e) compuestos de halógenos (HF, HCL) y f) material particulado (Ramírez, 2001). Específicamente, la industria cementera representa una huella de carbono con un valor aproximado de entre 38.3 y 2.4 giga toneladas de CO<sub>2</sub>, 71% del total de CO<sub>2</sub> antropogénico de 1928 a 2018 (Andrew, 2018). Muchos de los gases mencionados anteriormente contaminan el aire poniendo en peligro la salud humana, vegetal y animal.

Gran parte de la energía que se produce en la industria de la construcción es absorbida por ésta, así como el procesamiento de la mayoría de materias primas. Lo cual es una gran problemática ante la crisis energética que atraviesa el planeta, ya que implica un incremento significativo en la emisión de gases de efecto invernadero.

Los detractores del adobe olvidan, además de la amplia disponibilidad de su materia básica, el ahorro en gastos de transportación y diversas ventajas por su extraordinaria mejoría y criterio sustentable de poderse elaborar *in situ*. A la par, el colorido y cálido patrimonio vernáculo se transforma hoy en día en amplias barriadas y rancherías de color gris, que no ayudan a conservar los previos climas humanos de convivencia y tolerancia por falta de valoración de este añejo material. Se acarrea también la pérdida de valores como los estéticos y los de profundo arraigo o pertenencia. La tradición cultural es sustituida por la homogeneización arquitectónica.

El desarrollo rural sustentable en México en las últimas décadas ha transitado por situaciones incompatibles, por un lado, los procesos acelerados de urbanización y por el otro, el incremento de la pobreza, es decir, gran parte de la población rural forma parte mayoritariamente de la pobreza extrema, que incluye: desnutrición, altos índices de natalidad, insalubridad, insuficiencia de vivienda, atraso en los servicios básicos, entre otros. Las regiones rurales y campesinas encarnan gran significación porque constituyen espacios vitales para la situación ambiental de todo el país. Los desafíos que surgen en los ecosistemas rurales, como la erosión, la deforestación y las variaciones en la hidrología, entre otros, no se limitan únicamente a estas áreas, ya que representan cambios y disputas medioambientales que repercuten en toda la humanidad. De tal modo que la sustentabilidad es una responsabilidad compartida.

De manera general, diferentes estudios sobre la imagen urbana de poblaciones turísticas han sido focalizados desde el urbanismo y la arquitectura. El objetivo es precisamente abordar las particularidades de un conjunto de variables interdisciplinarias que configuran, alteran o enriquecen las cualidades “típicas” de poblados que cuentan con

elementos patrimoniales en riesgo. De esta manera, esta investigación, permitirá incluir criterios más allá de la estética, la geometría y las proporciones de edificios y viviendas. En concreto, una problemática en cuanto al patrimonio arquitectónico de tierra es que no se han diversificado las miradas sobre la edificación para adentrarse en aspectos educativos, sociológicos, constructivos y muy particularmente, de la conformación de la identidad local, más que una catalogación de inmuebles. Así, la innovación que pretende aportar esta investigación es esta diversidad de análisis que permitirá identificar en qué aspectos se vulnera la singularidad de una ciudad o pueblo en el sentido de homogeneizar o uniformar el aspecto exterior y físico de dichas edificaciones y espacios urbanos dentro de una intervención institucional y de particulares no siempre resulta acertada.

La problemática ambiental es una crisis civilizatoria conforme a Leff (2014), porque está en peligro la biodiversidad y ha desencadenado procesos incompatibles con la sustentabilidad. La reutilización de materiales de desecho en el ramo de la construcción, como es el caso del adobe, proporciona alternativas con múltiples beneficios en términos materiales, culturales, sociales, económicos y ambientales.

Otro inconveniente es no contar con diversas alternativas para la edificación como es la bioconstrucción, que se define como la edificación de sistemas constructivos empleando materiales biológicos o de bajo impacto ambiental. Así mismo, para desarrollar estrategias efectivas que originen acciones más sustentables en la construcción es necesario conocer el pensar de los habitantes y conocer sobre de la sustentabilidad, los significados y las ideas compartidas (Techio, Pereira Gonçalves, & Poliana Neres, 2016). De esta forma se crean procesos de diseño disminuyendo las limitantes y las aplicaciones técnicas para acercarse más a las actividades humanas (Hernandez-Omaña, De Hoyos-Martínez, & Estrada-Olivella, 2017).

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Dentro del urbanismo se encuentra el patrimonio edificado, sin embargo: “La dinámica presente que caracteriza la actuación de la sociedad contemporánea ha llevado a una cultura de la inmediatez, en la que se desconoce el valor del patrimonio frente a las más diversas necesidades sociales” (Falls, Danelis, & Chaos Yeras, 2018, pág. 42). Es por ello, que resulta indispensable comprender el fenómeno del urbanismo desde diversas disciplinas, en este caso desde la ingeniería, ecología, economía y la sociología.

Un Programa Nacional que contemple los siete elementos de la vivienda adecuada establecidos por ONU-Hábitat, al parecer se da por primera vez en México: seguridad de la

tenencia; disponibilidad de servicios, materiales, instalaciones e infraestructura; asequibilidad, habitabilidad, accesibilidad; ubicación y adecuación cultural. De esta forma, se pretende que todos los involucrados impulsen estos criterios en los planes, reglas y programas de cada institución. La nueva política de vivienda hace énfasis en los grupos más vulnerables, para restituir el acceso a la vivienda comprendida como un derecho; esto en consonancia con el objetivo 2: Política Social del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Así, se toma en cuenta a la vivienda que ha dejado de ser un producto comercial separado del territorio para convertirse, desde la política pública, en un espacio habitacional inherentemente vinculado al territorio. Por lo cual, este programa anhela que las magnas transformaciones impliquen la convocatoria de la mayor cantidad de convicciones. Su éxito depende de todos y cada uno de los actores del sector, de gobiernos locales, de instituciones públicas, privadas y sociales, de la sociedad y de todos los mexicanos que tienen un compromiso real con el desarrollo del país.

Por lo anterior, resulta impostergable proponer estilos constructivos acordes a estas políticas. El adobe como material edificable, es un medio económico y cultural que está en función de su valor de uso como patrimonio artesanal (Roux-Gutiérrez & Olivares-Santiago, 2002) (Rodríguez-Díaz, y otros, 2014) (Ortega, 2009). La reevaluación de la cultura en el contexto de la interacción entre la naturaleza y los seres humanos ocurre mediante la presencia de un legado natural y un legado social. El adobe engloba valores de identidad en nuestro país y en diversos contextos, en la opinión de Vázquez García y Munguía Lino (2015), estos valores pueden categorizarse en: valores socioculturales, económicos o tecnológicos inmersos en una dinámica ambiental que los vuelve sustentables.

La relevancia de este trabajo de investigación radica en brindar una alternativa sustentable en la construcción de vivienda utilizando adobe, considerando la calidad de vida, la identidad cultural, histórica y social del patrimonio edificado.

Por lo antes mencionado, esta propuesta apoyará principalmente a la población rural y en extrema pobreza (Ruiz-Serrano, 2019). En México, la pobreza representa un problema constante: entre 2008 y 2018 el número de personas en situación de pobreza se incrementó de 2.9 millones a 52.4 millones de personas, que se caracteriza principalmente por la falta de servicios de salud, educación, y de vivienda apropiados. Los estados de la República en donde existe mayor incidencia de pobreza extrema son Guerrero, Chiapas, y Oaxaca (CONEVAL, 2019). Asimismo, se requiere impulsar procesos de educación, capacitación y comunicación ambiental que propicien valores necesarios para contribuir al desarrollo sustentable de México con Visión 2040 (Estrategia de Educación Ambiental para la

Sustentabilidad en México. Estrategia Nacional 2015-2040, 2015) Mediante el uso de adobe, se podrá lograr un ahorro energético considerable, ya que, al contener compuestos a base de fibras naturales como el bagazo del agave, le aporta una resistencia mayor a la compresión y ligereza al bloque, suministrando una ruta de reciclaje fácil y de bajo costo para la gestión de los mismos, añadiendo valor a sus residuos (Ruiz-Serrano, 2019). De la misma manera, un estabilizador puzolánico o de ceniza mejorará las propiedades mecánicas (impermeabilidad y resistencia mecánica) del material de construcción.

En resumen, la principal justificación de este proyecto es transformar el adobe como producto sustentable de alto valor con potencial aplicación en la construcción de viviendas, promoviendo la sustentabilidad y revalorando la identidad cultural de la arquitectura tradicional mexicana.

### 1.3 HIPOTESIS

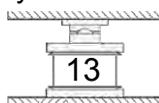
El uso de fibras de agave y ceniza subproductos provenientes del proceso de elaboración de mezcal modificará las propiedades físicas y mecánicas del adobe de Santa María la Asunción, Zumpahuacán, Estado de México.

### 1.4 OBJETIVOS

Objetivo general: evaluar y cuantificar el efecto de la adición de fibras y ceniza subproducto de la elaboración de mezcal artesanal sobre las propiedades físicas, mecánicas, económicas y constructivas del adobe.

Objetivos particulares:

- Analizar granulométricamente la arcilla, ceniza y arena para los adobes
- Analizar la densidad de sólidos, humedad, peso volumétrico, límites de plasticidad, prueba Proctor, compresión simple, colorimetría, fluorescencia y difracción de rayos x de las muestras
- Obtener imágenes de las muestras con el microscopio electrónico de barrido
- Caracterizar las fibras de bagazo de agave midiendo las longitudes y el peso de las fibras de bagazo de agave (*angustifolia Haw*), fluorescencia y difracción de rayos x
- Obtener los valores de acidez y alcalinidad (pH) de los líquidos de las mezclas
- Conformar los adobes in situ, con diferentes proporciones de fibra y ceniza
- Probar experimentalmente los adobes elaborados en la prensa hidráulica para conocer su resistencia a la compresión vertical
- Realizar pruebas de resistividad y absorción a los especímenes elaborados



- Contrastar las propiedades mecánicas del adobe tradicional y el adobe adicionado con fibras de agave y ceniza como estabilizador
- Diagnosticar los impactos ambientales de este nuevo material, a través de un análisis de ciclo de vida
- Impulsar el uso de materiales artesanales para la construcción como estrategia para el desarrollo sustentable de la región

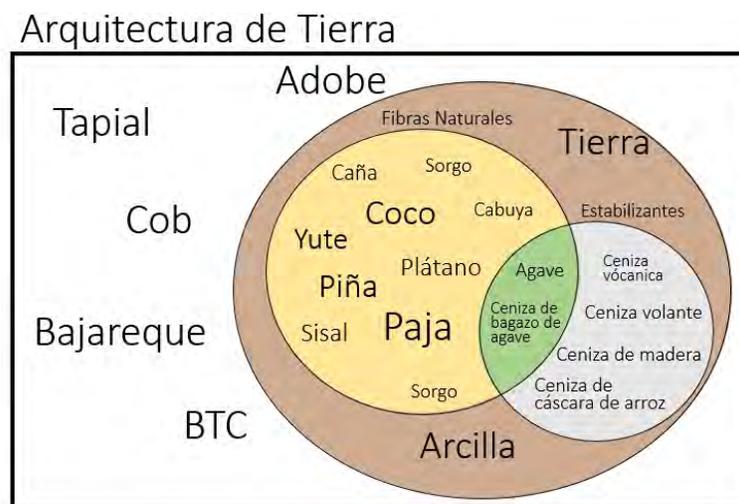
## II. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 ARQUITECTURA DE TIERRA

La arquitectura de tierra comprende aquellas estructuras construidas con suelo natural, comúnmente adicionado con fibras y secado al sol, creando espacios habitables. Este tipo de arquitectura se puede encontrar en múltiples localidades y asentamientos humanos, desde las primeras civilizaciones hasta nuestros días. Cabe mencionar que la arquitectura de tierra forma parte de la bioconstrucción ya que emplea materiales naturales y/o de bajo impacto ambiental, además de buscar integrar la edificación al entorno.

Para Guerrero-Baca (2007), los recursos existentes en cada localidad generan técnicas constructivas que con diversos grados de exclusividad y en mixtura con otros materiales, se diferencian de región en región. Existe un gran número de técnicas de arquitectura de tierra, en el siguiente diagrama se pueden observar las más comunes, así como algunos de los componentes de las mezclas que abordaremos en esta investigación:

**Figura 1.** Diagrama de técnicas y materiales de arquitectura de tierra.



Fuente: Elaboración propia.

Las técnicas más conocidas de arquitectura de tierra son las siguientes: a) adobe b) bajareque c) Cob d) BTC e) Tapial. Son muchos los factores que han incidido en el perfeccionamiento o abandono de diversas técnicas constructivas entre los que se encuentran la disponibilidad de recursos naturales, las formas de organización comunitaria, la división del trabajo, los intercambios comerciales, las tradiciones, la geografía local, entre otros, explica Guerrero Baca (2007). Las estructuras terreas tienen como desventajas los movimientos sísmicos y el agua, así como grandes concentraciones de humedad, por lo tanto, la búsqueda de resistencia a sus embates ha guiado la generación de respuestas formales, experimentales, materiales y dimensionales.

### 2.1.1 EL ADOBE

El adobe ha sido un material de construcción ancestral, múltiples culturas tienen registro de ello. La ciencia, la técnica, la religión y el arte en las edificaciones en tierra, han sido asociados a los antiguos grupos étnicos de Mesoamérica a través de un profundo conocimiento del contexto ambiental. Cuantiosas referencias de esos atributos fueron documentados en las crónicas de la conquista de México (Gama-Castro, y otros, 2012). No obstante, debido a la transformación cultural y al desgaste de las tradiciones indígenas, gran parte de ese conocimiento se ha extraviado en términos de su utilidad práctica. Varios autores indican que a lo largo de milenios, las comunidades indígenas de América han utilizado el adobe como material de construcción para viviendas, tanto en regiones de Mesoamérica, del suroeste de Estados Unidos y en el área andina de Sudamérica. La importancia de la arquitectura de tierra radica en que, según la UNESCO (2011), alrededor de la mitad de las viviendas en todo el mundo están construidas con este material, y aproximadamente el 10% de los sitios incluidos en la lista de patrimonio mundial son ejemplos de este tipo de arquitectura.

El adobe tradicional, bloque compuesto por tierra, arcilla y fibras de paja, es el más empleado en el mundo y su utilización representa una alternativa viable para resolver el problema de la escasez de viviendas, que a la vez sea de bioconstrucción (Del Pino & Estramil, 2015) y bioclimática (Saenz-Pérez, 2015). Por otro lado, una limitante para llevar a cabo tal alternativa consiste en la poca documentación científica de dichas técnicas artesanales, ya que la mayoría de ellas son consecuencia del conocimiento empírico y varían en cada cultura y región. Al día de hoy, existen diversas investigaciones acerca de la elaboración de adobes (Ramírez-Rodríguez, Aguiluz-León, & Gutiérrez-Martínez, 2013) (Colozio, Sato, & Giuseppe, 2013). Algunos resultados como los de (Rodríguez-Díaz, y

otros, 2014) dan recomendaciones técnicas al respecto: a) seleccionar una longitud de muro adecuada b) evitar el ascenso de la humedad por capilaridad c) elegir un mortero adecuado para asegurar una unión resistente entre los bloques u otro material d) delimitar el espacio arquitectónico mediante cerramientos, dinteles, etc. e) supervisar la velocidad de levantamiento f) proteger vanos y proveer de un revestimiento adecuado para disminuir los daños a causa de las condiciones climáticas.

**Figura 2.** Antiguo casco de hacienda de adobe.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

La innovación y evolución del adobe ha permitido modificar, mejorar y estabilizar diferentes propiedades características del material. Entre las diversas propiedades del adobe, se encuentran: la porosidad, flexibilidad, compactación, plasticidad, adhesividad, entre otras. Para fines de esta investigación las propiedades mecánicas tendrán especial interés, tanto la resistencia a la compresión como el porcentaje de absorción.

Algunas ventajas del adobe son: a) bajo costo unitario b) bajo consumo energético por sus cualidades aislantes c) permite realizar formas suaves y redondeadas d) resulta fácil de retocar en futuras reformas de muros e) versátil para las instalaciones de tuberías y red eléctrica f) disminuye la intrusión de los ruidos externos g) material sustentable que propicia la economía circular, entre otros.

El adobe, es una pieza constructiva en forma de bloque o ladrillo compuesto principalmente por arcilla, arena y agua (algunos pueden contener cal o materiales fibrosos). Debido a sus proporciones geométricas, composiciones químicas, propiedades mecánicas, estos varían de región a región, a continuación, se puede observar una tabla con diferentes adobes del mundo según sus resistencias a la compresión:



**Tabla 1.** Resistencia a la compresión del adobe en el mundo.

País	Resistencia (MPa)	Referencias
Bélgica	1.96	(Cutíño, Rotondaro, & Esteves, 2020)
Colombia	2.94	(Cutíño, Rotondaro, & Esteves, 2020)
Cuba	2.10	(Saroza, Rodríguez, Menéndez, & Barroso, 2008)
El salvador	0.29-0.49	(Cutíño, Rotondaro, & Esteves, 2020)
Estados Unidos	2.05	(Cutíño, Rotondaro, & Esteves, 2020)
Italia	0.29-1.56	(Liberatore, y otros, 2006)
Marruecos	2.83	(Baglioni, Fratini, & Rovero, 2010)
México	1.18	(Meli, 2005)
Perú	2.96	(González de La Cotera, 1995)
Portugal	1.17	(Silveira, y otros, 2012)
Uruguay	1.07	(Cutíño, Rotondaro, & Esteves, 2020)

Fuente: Elaboración propia.

En nuestro país la diversidad de los adobes también es notoria y, por lo tanto, también sus niveles de resistencia a la compresión. Esto lo podemos observar en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Resistencia a la compresión del adobe en el México.

Estado/ciudad	Resistencia (MPa)	Referencias
Chiapas: Tuxtla Gutiérrez	2.46	(Ruiz & Vidal, 2015)
Guanajuato: Guanajuato	1.3	(Puy-Alquiza, y otros, 2019)
Guerrero: Acapulco	1.16	(Arroyo-Matus, Sánchez-Tizapa, & Catalán-Quiroz, 2013)
Jalisco: Tlajomulco	1.5	(Preciado, Ramirez-Gaytan, Santos, & Rodriguez, 2019)
Oaxaca: Oaxaca	1.23	(Catalán-Quiroz, Moreno-Martínez, Arroyo-Matus, & Galván, 2019)

Fuente: Elaboración propia.

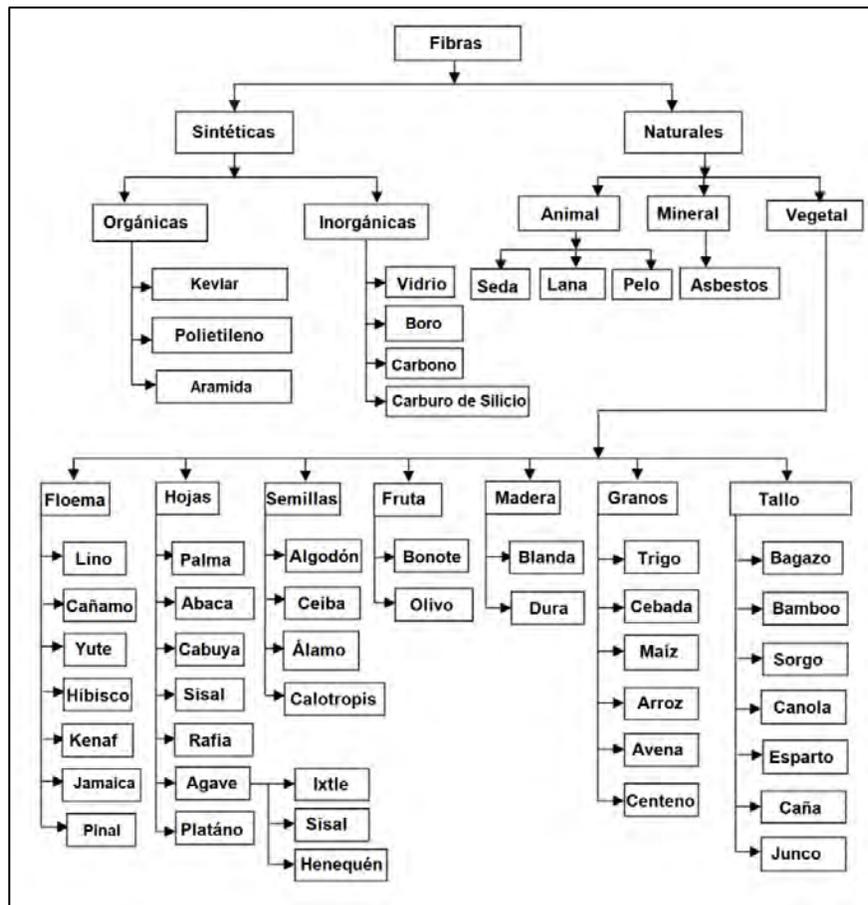
Con el fin de mejorar los atributos físicos del adobe como la resistencia al intemperismo, la aglutinación, y dureza, es recomendable incorporar materiales orgánicos fibrosos, tales como subproductos agroindustriales o naturales. Otras investigaciones demuestran otros beneficios, de acuerdo con Hernández-Moreno, Ocaña-Ponce y Mejía-López (2014), quienes emplearon un enfoque basado en la norma ISO 15686 para estimar la vida útil de activos construidos, llegaron a la conclusión de que aunque este método no

es infalible, su propuesta metodológica resulta altamente beneficiosa para una estimación preliminar, ágil y aproximada de la vida de inmuebles o componentes arquitectónicos necesarios para el diseño y la construcción. Este enfoque resulta particularmente valioso para profesionales como arquitectos, constructores, desarrolladores inmobiliarios e ingenieros.

### 2.1.2 FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales son sustancias filamentosas de origen biológico, que se pueden hilar para obtener hebras, hilos o cordelería. Conforme a su origen, las fibras naturales se pueden clasificar en vegetales, animales o minerales, como se puede observar en el siguiente diagrama:

**Figura 3.** Clasificación de las fibras.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Sahu y Gupta (2017).

Las fibras poseen una gran cantidad de propiedades físicas, químicas, biológicas, entre otras. Para fines de esta investigación nos enfocaremos en las propiedades

mecánicas para mejorar la resistencia a la compresión de los bloques de adobe al adicionar dichas fibras. En seguida se muestra una tabla de cada fibra con sus características mecánicas:

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas de fibras naturales.

Fibra natural	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Porcentaje de falla a la tensión (%)
Abacá	12	41	3.4
Agave Americana*	68-132	0.6-2.8	11-27
Agave Angustifolia Haw*	163-549	11.6-23.9	1.1-2.8
Algodón	500	8	7
Bagazo de caña	290	17	-
Bambú	575	27	-
Cáñamo	530	45	3
Coco	140.5	6	27.5
Kapok	93.3	4	1.2
Lino	700	60	2.3
Piña	1020	71	0.8
Plátano	721.5	29	2
Sisal	531	18.7	2.2
Yute	325	37.5	2.5

Fuente: Adaptado de (Latif, y otros, 2018)\* y (Silva-Santos, Hernández-Gómez, Caballero-Caballero, & López-Hernández, 2009).

Al adicionar fibras naturales a la mezcla de los adobes, se genera una matriz que sirve de aglutinante y provee de plasticidad al material. Esta matriz evita los patrones de agrietamiento derivados de concentraciones de humedad y temperatura, mejorando así, la estabilidad del conjunto.

### 2.1.2.1 FIBRAS DE AGAVE

Los agaves se originaron hace aproximadamente 10 millones de años. Se ha datado que en nuestro país gracias a evidencias arqueobotánicas en el estado de Oaxaca, cerca del año 10,800 a. C., los primeros pueblos extraían fibras de maguey (Agave espadín) para alimentación. En los siguientes tres mil años, se encontraron utensilios como redes, calzado y cordeles, elaborados con fibras de yuca y maguey. Con el auge del vestido en el México prehispánico (1300-800 a.C.), se elaboraron las primeras indumentarias de dichas fibras y así la diversificación de sus usos (Palma, 2000).

**Figura 4.** Morfología del agave.



Fuente: (CONABIO, 2006).

En la figura 4 se observa la anatomía de un agave incluyendo sus segmentos principales (raíces, tallo, hojas, corazón, quiote, flor, etc.) En la botánica, existen divisiones taxonómicas de los seres vivos, dentro del reino *plantae* (que comprende a los seres vivos mayormente fotosintéticos, formados por celulosa y de origen terrestre) podemos ubicar al agave *Angustifolia Haw*, por familia, género y especie.

**Tabla 4.** Clasificación taxonómica del agave.

Familia	Género	Especies	
Agavaceae →	Agave (211 especies) →	A. Americana	A. Durangensis
	Yucca (50 especies)	A. Angustifolia (Haw)	A. Rhodacantha
	Furcraea (25 especies)	A. Cupreata	A. Maximiliana
	Manfreda (28 especies)	A. Tequilana	A. Inaequidens...
	Otros (27 especies)	A. Potatorum	A. Salmiana

Fuente: (CONABIO, 2006).

La república mexicana es el centro de diversidad biológica y cultural del agave a escala mundial, de las 211 especies, en nuestro territorio se pueden encontrar 159 de ellas (ver figura 5), lo que representa el 75% del total mundial. De las 109,568 hectáreas de agave sembradas en México, poco más del 80% corresponde al cultivo de agave azul. De

igual manera, sólo 14,460 hectáreas están destinadas a diferentes especies de agaves utilizados en la industria mezcalera (Portal de Agroproductores, 2020).

**Figura 5.** Mapa de especies y sembradíos de agave en México.



Fuente: (CONABIO, 2006)

La especie más utilizada para la elaboración del mezcal es el *angustifolia* Haw, clasificado por primera vez por el botánico inglés Adrian Hardy Haworth, este tipo de especie será utilizado para fines de esta investigación.

### 2.1.3 ADOBE ADICIONADO CON FIBRAS NATURALES

Los materiales fibrosos refuerzan la matriz interna de los adobes, aglutinando sus componentes. El tipo de fibra adicionada más común en el mundo es la paja (de diferentes gramíneas), después virutas de madera, acículas de pináceas, cáscaras de coco, tallos del maíz, yute, fibras de pita o sisal, agave. Existen sitios en los que históricamente se han empleado fibras de origen animal provenientes de pelo de llama, lana de ovejas o cabras, crines de caballo, o hasta cabello humano (Guerrero-Baca, 2007). En pocas palabras se han utilizado fibras naturales.

Además del adobe tradicional (tierra, arcilla y fibras de paja), en otras regiones se emplean otros tipos de fibras y/o elementos naturales. En la tabla 5 se pueden observar

distintas composiciones, proporción de fibras con respecto al total y resistencias a la compresión:

**Tabla 5.** Adobes adicionados con fibras naturales.

Composición del adobe	Resistencia a la compresión (MPa)	Proporción (% añadido)	Referencias
Tierra y abacá	2.99	0.25	(Lejano & Pineda, 2018)
Tierra y aserrín de pino	1.50	3	(Hurtado-Saldaña, 2018)
Tierra y bagazo de agave	4.39	18	(Ruiz-Serrano, 2019)
Tierra y bagazo de sorgo	4.21	3	(Babé, y otros, 2020)
Tierra y estiércol	3.75	2.5	(Ortiz, 2019)
Tierra y extracto de cabuya	2.67	50	(Benites, 2017)
Tierra y fibra de coco	3.51	0.25	(Chavez, 2019)
Tierra y fibra de plátano	1.41	10	(Hernandez, 2016)
Tierra y goma de tuna	2.70	15	(Bolaños, 2016)

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4 ESTABILIZADORES

A la tierra que será empleada para la construcción se le pueden agregar elementos naturales o artificiales para mejorar sus propiedades mecánicas. Según Ruiz et al. (1993), la selección del estabilizante óptimo dependerá del conocimiento del constructor, de la disponibilidad de los recursos en la zona, las proporciones, y las pruebas a ensayo y error.

Los estabilizantes pueden ser de origen vegetal, animal o mineral. Algunos ejemplos pueden ser fibras naturales, cenizas de madera, yeso, asfalto, melaza, cal y puzolanas (materiales que contienen sílice y/o alúmina, principalmente cenizas, ya sean volcánicas, volantes o de materia orgánica). El agregar dichos elementos a las mezclas cementantes, es un proceso que a través de siglos de experiencia ha permitido subsanar las posibles vulnerabilidades de los bloques de tierra, principalmente sísmicas e higrométricas. De tal forma que se mejoren sus cualidades.



Con base en Ruiz, Delgado y Hernández (1993), los efectos de un buen estabilizante son los siguientes:

- Incrementar la resistencia a la compresión y al impacto, además de reducir la dilatación o contracción.
- Aumentar la resistencia a compresión del adobe al aglomerar sus partículas.
- Reducir o eliminar completamente la absorción de agua (causante de dilataciones, contracciones y erosiones internas), rellenando los huecos y cubriendo las partículas de arcilla con una capa impermeable.
- Reducir el agrietamiento del adobe dándole flexibilidad la cual permite que el suelo se expanda o contraiga en algún grado.
- Reducir la expansión y contracción excesiva reforzando el suelo con material fibroso.

La estabilización se incrementa cuando el suelo se compacta en el moldeado. Generalmente la compactación (manual o mecánica) es suficiente para estabilizar el suelo, por otro lado, sin un estabilizador apropiado, el efecto puede no será duradero, especialmente en el caso de una mayor exposición al agua.

#### **2.1.4.1 CENIZAS**

Históricamente durante el imperio romano (27 a.C.- 476 d.C.) los constructores empleaban cenizas volcánicas, las cuales aportaron variadas propiedades aglutinantes y cementantes a las estructuras arquitectónicas que hasta el día de hoy se pueden visitar (Soria-Santamaría, 1983). Sin duda una gran e innovadora aportación para el sistema constructivo. La ceniza puede mezclarse con suelos arcillosos para mejorar su estabilidad y resistencia. Al agregar ceniza al suelo, se puede aumentar la capacidad de carga y reducir la expansión y contracción causada por la humedad. Esto es especialmente útil en el ramo de la construcción.

Algunos autores como Stulz y Mukerji (1997) mencionan que las cenizas minerales y las cenizas vegetales son populares como estabilizadores en la elaboración de adobes, principalmente de madera, subproductos agroindustriales, cascara de legumbres, bagazo, etcétera. Por ejemplo, la ceniza de madera dura, rica en carbonato de calcio, no siempre es adecuada para suelos arcillosos. Incluso algunas cenizas pueden ser perjudiciales para el suelo. Por otro lado, las cenizas minerales se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados.



En la siguiente tabla se muestran adobes estabilizados y sus diferentes y variadas composiciones:

**Tabla 6.** Adobes estabilizados.

Composición del adobe	Resistencia (MPa)	Proporciones (Porcentaje %)	Referencias
Tierra y ceniza de arroz	1.23	98% tierra + 2% ceniza de arroz	(Sasui, Watcharin, & Sirimas, 2018)
Tierra, cal y ceniza de bagazo de caña	21.3	80% tierra + 10% cal + 10% ceniza de bagazo de caña	Alavéz-Ramírez et al. (2012)
Tierra, cenizas de cascara de huevo y de cascara de arroz	1.5	97% tierra+1% ceniza de cascara de huevo+ 2% ceniza de cascara de arroz	(Valverde, 2019)
Tierra, cal y caolinita	3.7	90% tierra+10% cal y caolinita	(Millogo, Hajjaji, & Ouedraogo, 2008)

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4.1.1 CENIZAS DE BAGAZO DE AGAVE

Las cenizas de bagazo de agave son un subproducto generado durante el proceso de producción de tequila y mezcal, que se obtienen a partir del agave. Estas cenizas son ricas en minerales y se han utilizado tradicionalmente como un fertilizante natural en la agricultura. Las cenizas pueden obtenerse posterior al horneado de las corazones de agave o en la destilación de la pulpa molida.

Stulz y Mukerji (1997) plantean que es más efectivo añadir de 5 a 10% (por volumen) de cenizas blancas finas, de madera completamente quemada. Con esto se mejora la resistencia a la compresión en seco. Por otro lado, es importante tener en cuenta que el uso de cenizas de bagazo de agave debe realizarse de manera responsable y sostenible, y que no debe comprometer la calidad del suelo o del medio ambiente. Es necesario que se establezcan estándares y regulaciones adecuados para garantizar que se utilice de manera segura y efectiva. Para esta investigación se emplearon cenizas post horneado de las piñas de agave, principalmente de origen vegetal y con algunas trazas minerales.

**Figura 6.** Ceniza procedente del horneado.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

## **2.2 VIVIENDA RURAL**

La vivienda rural es un espacio construido en un entorno dominado por actividades agropecuarias, inmerso en ecosistemas naturales que cultiva, conserva, transforma o deteriora. Del mismo modo, la vivienda rural tradicional y transicional recurren a técnicas artesanales y materiales naturales del hábitat circundante (Rotondaro & Mellace, 2004). Constructivamente hablando, la vivienda rural moderna está constituida de materiales industriales (lámina, block, cemento, paneles, entre otras), combinando componentes y técnicas tradicionales.

Así mismo, la vivienda es un espacio cultural y también ritual de saber, ya que ocupa un lugar vertebral para las actividades ceremoniales, para la sociabilidad, así como para las relaciones y solidaridad comunitarias. La ocupación de la tierra y la distribución de funciones del trabajo campesino, se convierte en la estrategia básica para la organización espacial de la vivienda, tanto en ambientes interiores como en los exteriores, ya que constituyen el escenario transcendental de la vida familiar y concentran el 90% de sus actividades (Rotondaro & Mellace, 2004), esta descripción que se hace extensiva a Iberoamérica, como explican (Sánchez & Jiménez, 2010). De acuerdo a datos del INEGI (2020), en el Estado de México hay cerca de 4,215 localidades rurales y 679 urbanas.

**Figura 7.** Vivienda rural mexiquense.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

En México existe una crisis habitacional que necesita ser solventada. Según la Comisión Nacional de Vivienda, (CONEVAL, 2019), cerca de 9.4 millones de viviendas se encuentran en condición de rezago habitacional. De la misma manera, alrededor de 73.6 millones de mexicanos se encuentran prácticamente fuera del mercado formal de vivienda al no percibir ingresos por hogar equivalentes a más de cinco salarios mínimos. Debido a lo anterior, el gobierno federal a través de los programas de vivienda anual (Gobierno Federal, 2021) tiene como meta cumplir los siguientes objetivos:

- a) aumentar los mecanismos de otorgamiento de subsidios para cubrir necesidades en materia de vivienda en favor del bienestar social de las familias.
- b) coadyuvar en la consolidación del Sistema Nacional de Producción Social de Vivienda.
- c) garantizar la calidad y sustentabilidad de la vivienda.
- d) reducir la carencia de una vivienda adecuada de la población en condiciones de vulnerabilidad. Si bien estos programas federales benefician a cierto grupo de familias rurales, alternativas de autoconstrucción con materiales económicos, ecológicos y culturales coadyuvaría a subsanar la crisis habitación actual en nuestro país.

### III. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 SUSTENTABILIDAD

En 1987, el informe Brundtland de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), definió sustentabilidad como: “*satisfacer las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer a las futuras generaciones*”. Debido a que este informe se redactó en inglés, existieron diversas traducciones del término al castellano. Las traducciones del término *sustainability* a sustentabilidad o sostenibilidad, son hasta el día de hoy tema de debate en la comunidad científica.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2018), perteneciente a la ONU, si existe una diferenciación teórica. La CEPAL es un organismo que constantemente desafía los convencionalismos internacionales, construyó una teoría del desarrollo desde América Latina y el Caribe para las condiciones históricas de los países de la región, superando el eurocentrismo y la idea de un único modelo.

Sostenible es lo que es “capaz de sostener o de sostenerse”, y sustentable aquello que es “capaz de sustentar o sustentarse” (Cortés & Peña, 2015, pág. 55) , de igual modo, Pujadas (2011) discurre que “*sustainable development*” se puede considerar como el proceso de desarrollo económico, humano y medioambiental, el cual es independiente de una asistencia externa para mantenerse, en resumen, un desarrollo sostenible en el tiempo. Se sugiere que se apliquen los términos sustentabilidad, sustentable y desarrollo sustentable en la totalidad de sus dimensiones entendiendo la diferenciación con los términos sostenibilidad, sostenible y desarrollo sostenible por cuanto su aplicabilidad, y sobre todo, por su intención de hacer durable en el tiempo ese equilibrio entre sus componentes y así poder reflexionar sobre la gestión del proyecto o la política desde un indudable enfoque sustentable (Hernández-Rivera, Alcántara-Salinas, Blanco-Orozco, Houbron, & Pérez-Sato, 2017).

Si se hace referencia a la sustentabilidad, pero sin un enfoque disruptivo, como explican Mariño, Flores y Bonilla (2018), se estará al corriente que el planteamiento que da lugar al concepto de sostenibilidad. Por el contrario, cuando se hace referencia a la sustentabilidad bajo un enfoque crítico del crecimiento económico descontrolado, de cara a nuevas formas de organización social o bien, con relación a perspectivas ecosistémicas distintas a los planteamientos económicos tradicionales, el debate ya será diferente y debe comprenderse en el marco de un debate crítico de la visión frecuentemente admitida de lo que es la sostenibilidad.

**Figura 8.** Diagrama de la sustentabilidad.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de (Naturpiedra, 2021).

En la tabla siguiente se muestran las características de sustentabilidad para el objeto de análisis de la presente investigación.

**Tabla 7.** Análisis de sustentabilidad del adobe propuesto.

Ambiental	Económica	Social
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable</li> <li>• Compostable</li> <li>• Reciclable</li> <li>• Renovable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente</li> <li>• Maleable</li> <li>• Bajo costo</li> <li>• Disponible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identidad cultural</li> <li>• Conocimientos tradicionales</li> <li>• Artesanal y patrimonial</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

El modelo comunitario del desarrollo sostenible se basa en revitalizar y fortalecer las culturas autóctonas, así como en fomentar las economías de autosuficiencia. Este enfoque tiene como objetivo satisfacer las necesidades internas de la comunidad y luego expandirse hacia el mercado externo. Está especialmente dirigido a las zonas rurales, promoviendo la independencia y autogestión de la comunidad para abordar sus propios desafíos y determinar su propio rumbo. Reafirmando así su identidad cultural, impulsar el uso de tecnologías tradicionales y permitir una vida de calidad (Mello, y otros, 2017).

Por todo lo anterior, para lograr que la industria de la construcción se lleve a cabo de manera sustentable, es imperante considerar la interrelación de los aspectos económicos, ambientales y sociales de la población y del lugar en específico en donde se realizarán las obras arquitectónicas.

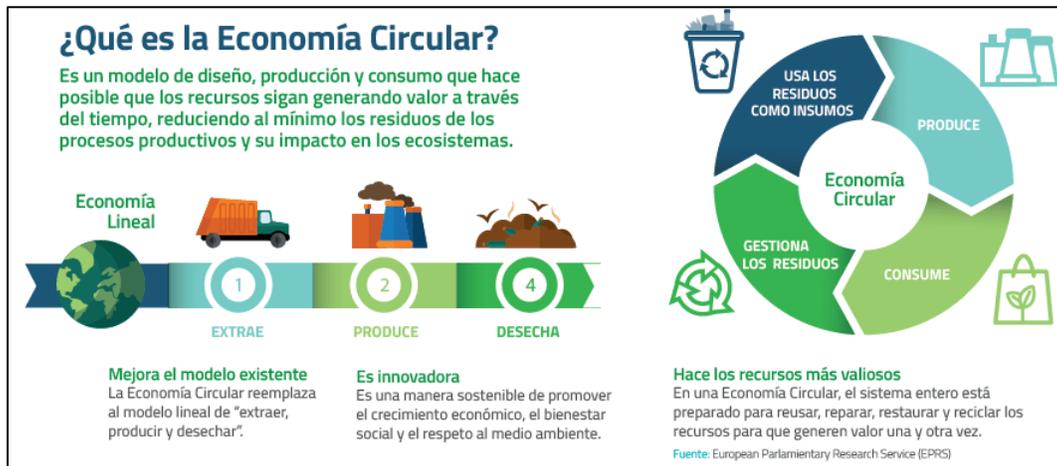
### 3.1.1 PERSPECTIVA ECONOMICA

La economía sustentable reconoce que el crecimiento económico no puede ser a costa del medio ambiente y de la calidad de vida de las personas. Por ende busca ser eficiente en todos sus procesos.

#### 3.1.1.1 ECONOMÍA CIRCULAR

Además de reducir, reutilizar y reciclar, es necesaria una transformación más profunda y duradera que incluya reducir los impactos ambientales producidos por las actividades humanas. Lina Lett (2014), propone un cambio al paradigma, un modelo en el cual el residuo tenga un papel dominante, un modelo cíclico que imite a la naturaleza y se conecte con ella, en palabras del autor: “el residuo pierde su condición de tal y se convierte en la materia prima alimentaria de los ciclos naturales o se transforma para formar parte de nuevos productos tecnológicos, con un mínimo de gasto energético” (Lett, 2014, pág. 2).

**Figura 9.** Diagrama de economía lineal y circular.



Fuente: (Ecodisruption, 2021).

Para Fernández (2015), la economía circular reduce el impacto ambiental de la actividad productiva, donde se procura la reutilización de los desechos de manera que los componentes utilizados se convierten en insumos nuevamente, reduciendo el gasto energético y el impacto ambiental. Este autor propone cinco estrategias de circularidad de recursos, las cuales son: 1) aumentar la vida útil del producto 2) fomentar la reutilización del producto 3) asegurar la recuperación del producto y su nueva puesta en el mercado 4) fomentar la recuperación parcial del producto y 5) asegurar el reciclaje de las materias primas del producto (Fernández Alcalá, 2015, pág. 723). De aquí la importancia de reincorporar “desechos” al adobe como producto nuevo.

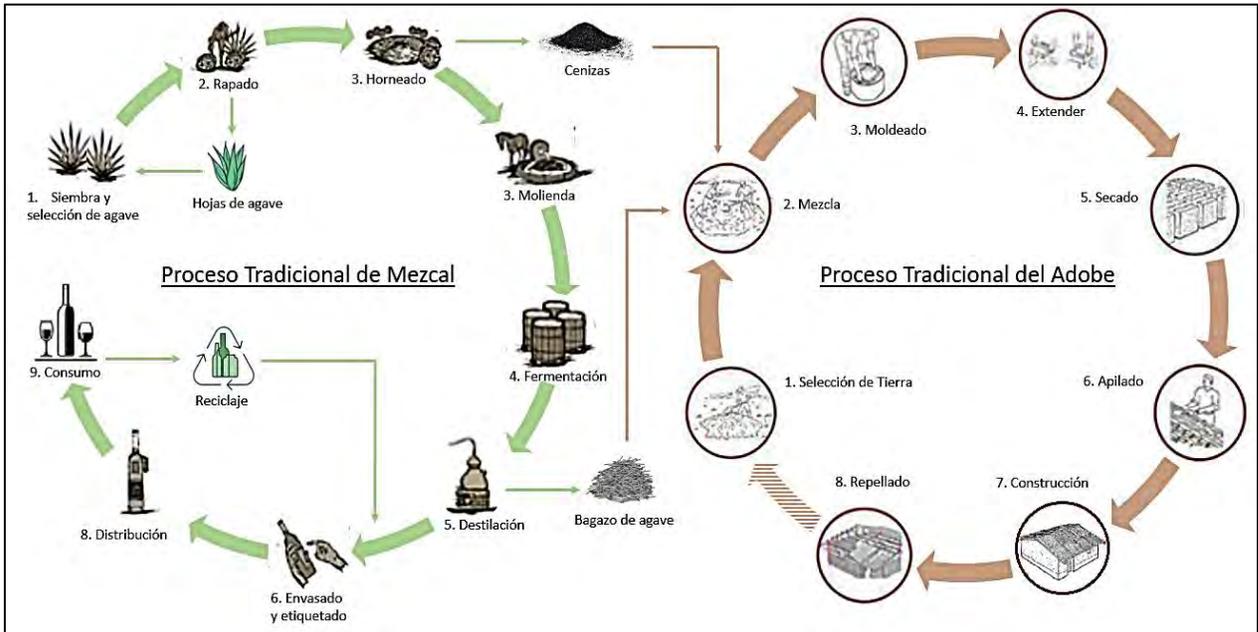
Para el Plan Nacional de Desarrollo del Gobierno Mexicano, la economía circular forma parte de los “Pilares de la Nueva Visión Agrícola” los cuales son los siguientes: a) sustentabilidad ambiental (prevención de la generación de residuos durante el procesado y posterior a la cosecha) b) seguridad alimentaria y c) crecimiento económico. El primer pilar es el centro de la presente propuesta ya que al incorporar residuos orgánicos de la cosecha del agave al adobe promovemos la sustentabilidad ambiental.

Entre la multitud de productos de desecho, se halla el bagazo del agave, una fibra subproducto de la producción de tequila y mezcal. El Tequila y el mezcal se obtienen de la remoción de azúcares a partir de la cocción de los corazones de agave, que posterior a la molienda da lugar a un subproducto llamado “bagazo”, un subproducto fibroso. Al cierre de 2019, se produjeron 351.7 millones de litros de Tequila, según opina De la Rosa (2020), lo que es igual a 669 litros producidos por minuto, generando cerca de 400 a 600 kilotoneladas de bagazo. El compostaje fue el destino del 90% de estos residuos, no obstante, esta investigación propone una vía alterna de alto valor añadido mediante la aplicación de un nuevo material de origen biológico compuesto a partir de residuos agrícolas adicionados al adobe para su construcción. Esto podría impulsar el crecimiento de distintas cooperativas comunitarias al diversificar su oferta con nuevos productos basados en la bioconstrucción, estimulando tanto el desarrollo económico a través de la creación de empleos como el desarrollo social. Los productores de tequila o mezcal tendrán la opción de transformar estos subproductos en materias primas utilizables en la construcción.

De acuerdo con Arroyo (2018), continuar con el modelo de producción lineal ocasionará un futuro no muy lejano de insuficiencia de recursos naturales. Mejorar las prácticas y procesos productivos a través del modelo de la economía circular, además de una inversión en tecnología e innovación pueden ser las claves para un desarrollo sustentable para asegurar un futuro próximo prometedor.

Esta investigación se rige conforme a los principios de la economía circular al vincular dos procesos productivos como el del mezcal y el adobe, aprovechando los “desperdicios” de uno para insertarlos en la cadena productiva del otro, en seguida se presenta un diagrama de lo mencionado anteriormente.

**Figura 10.** Diagrama de economía circular proceso de mezcal y adobe.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 PERSPECTIVA AMBIENTAL

La construcción sustentable es un enfoque de diseño y construcción que tiene como objetivo minimizar el impacto ambiental de los edificios y promover la conservación de recursos naturales y la calidad de vida de las personas que los utilizan.

#### 3.1.2.1 BIOCONSTRUCCIÓN

La bioconstrucción es un enfoque de construcción de edificios que utiliza materiales naturales y técnicas constructivas que respetan el medio ambiente y la salud de las personas. Se basa en el uso de materiales y técnicas que son ecológicas, renovables, biodegradables y saludables para las personas y el medio ambiente (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008).

Los materiales utilizados en la bioconstrucción incluyen madera, paja, arcilla, arena, roca, carrizo, sisal, cáñamo, o algún otro elemento. Estos materiales se caracterizan por su baja emisión de gases contaminantes y su capacidad de regular la humedad y la temperatura, lo que mejora el confort interior del edificio.

**Figura 11.** Bagazo de agave in situ (a) y en recolección (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Entre las técnicas de construcción de la bioconstrucción se encuentra la edificación con adobe, con balas de paja, tapial, Cob y la construcción con madera. La bioconstrucción busca una integración armoniosa entre el edificio y el entorno natural, aprovechando las condiciones climáticas y geográficas del territorio para lograr un ambiente saludable y confortable. Además, busca la utilización de tecnologías sostenibles, como sistemas de recolección de agua de lluvia, sistemas de energía renovable, sistemas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.

De igual manera, la bioconstrucción es una alternativa a la construcción convencional que promueve la sostenibilidad, la salud y el respeto por el medio ambiente. Además, contribuye a la creación de edificios más eficientes y duraderos, que pueden tener un menor impacto en el medio ambiente y mejorar la calidad de vida de las personas que los habitan.

### **3.1.3 PERSPECTIVA SOCIAL**

Desde una perspectiva social, el adobe ha sido un elemento importante en la construcción de viviendas y edificios comunitarios en muchas culturas, ya que es un material económico y accesible para comunidades con recursos limitados.

#### **3.1.3.1 PATRIMONIO CULTURAL**

El patrimonio arquitectónico de tierra cuenta con valores estéticos, urbanísticos identitarios, ambientales y económicos esencialmente. Por ello, es importante demostrar

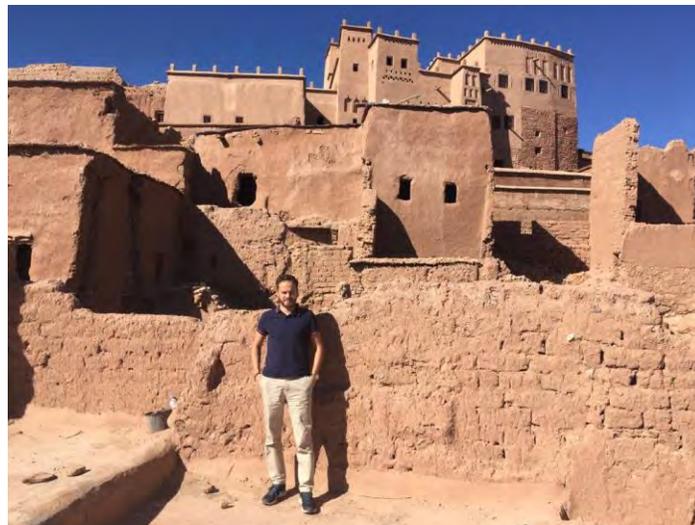
que la vivienda construida de adobe con bagazo de agave ofrece mejor calidad de vida y entornos de confort para sus habitantes, permitirá revalorar el patrimonio cultural mexicano.

El urbanismo implica condiciones que deben ofrecer los espacios a sus habitantes y se destaca la defensa de espacios inclusivos como elemento estructurante de la espacialidad, no obstante, la concretización de estos principios de organización democrática e institucionalizada del espacio no es de fácil lectura cuando, en las decisiones de planeación y propuestas no se considera la visión que tienen los pobladores al respecto. La transformación constante de los espacios contemporáneos ya sean públicos o privados no precisamente mejoran con el tiempo, por ello, la dimensión temporal tiene cada vez más injerencia sobre la dimensión espacial que se vive en la cotidianidad.

En los espacios rurales, al igual que en los urbanos, se deben comprender las características de cada sociedad y su desarrollo simbólico que en consecuencia genera una serie de valores culturales que resultan de gran trascendencia para los habitantes, pues a través de ellos se estructura la identidad, el arraigo y la apropiación de cada uno de los lugares.

La vivienda de tierra, como ya se ha mencionado, tiene mucha relevancia y ahora se puede considerar como vanguardista, seguramente por estos valores estéticos, culturales y ambientales que le brindan una especie de atmósfera encantadora, cálida o fresca según sea el caso y sobre todo amigable con las personas y el ambiente por derivar de la bioconstrucción.

**Figura 12.** Uarzazat, Marruecos. Ciudad patrimonio arquitectónico de adobe.



Fuente: archivo fotográfico personal.

Por otra parte, García Canclini (1999), comenta que una ciudad histórica, de barrios, monumentos e hitos en donde se interrelacionan costumbres y usos de sus habitantes, permite demostrar su evolución, proceso histórico y actividades económicas que se desarrollan en la ciudad o en diversos sectores industriales que revelen su esfuerzo por crecer económicamente, igualmente, se manifiesta la existencia de una ciudad globalizada, que se vincula con las redes mundiales de finanzas, la economía y las comunicaciones. Lo anterior, integra a la urbe el sentido de pertenencia del individuo a un barrio, ciudad o país otorgándole una identidad y una narración sobre sí mismo, sin embargo, en la actualidad, periodo donde acontece la hibridación, lo líquido y la globalización, han puesto en crisis la esencia de arraigo al lugar. En otras palabras, habrá que considerar el valor simbólico que otorga la ciudadanía al espacio urbano.

La revaloración de los bienes patrimoniales, no solo las arquitectónicas, incluidas las artesanías y la forma particular de construir bienes tangibles otorgan significados y simbolizaciones que en ocasiones transitan hacia otra actividad laboral. Sin duda, estos aspectos cualitativos del lugar donde se vive o se acude a él, es resultado de la apreciación de saberes populares y las prácticas de estas comunidades; resultado de esfuerzos acumulados por generaciones dentro de un sitio en particular, ya sea pueblo, barrio o ciudad. Por ello, se parte de lo general “el pueblo” a lo particular “vivienda”.

Cuando se suma esta visión urbano-arquitectónica de la ciudad o pueblo a la de la vivienda, se establecen dicotomías entre la esfera de la normatividad que establecen dependencias de dicho sector y los valores de imagen urbana de un lugar o población que, en aquellos casos de intenso valor estético-artístico, generalmente se asocian a ciertas singularidades o fisonomías de la imagen urbana que pueden verse afectadas. Esta distorsión o afectación se inicia con intervenciones institucionales estandarizadas, homogeneizantes o, bien conceptualizados como *No lugares* según Augé (2000), repetidos en cualquier parte del orbe o, en el caso particular de este estudio, del Estado de México. Son también, los procesos de conservación, rescate, restauración arquitectónica o simples remodelaciones, las acciones que van haciendo perder características locales en aras de un cumplimiento a la normatividad que ha sido establecida por la Secretaría de Turismo, tanto a nivel federal como la mexiquense y les van generando un sentido de “lugaridad” negada o producida artificialmente, así pues, con dichas intervenciones arquitectónicas se van configurando rasgos similares a los de muchas otras poblaciones y caen, por tanto, en una definición de no – lugares.

Ataviar el ambiente identitario y simbólico que existe en los Pueblos Mágicos, pueblos típicos o pueblos con encanto como arquetipos urbanístico/arquitectónicos emblemáticos de las diversas localidades del país, permitirá una reinterpretación de la vida cotidiana y la responsabilidad social comunitaria de estos espacios. Es importante conocer la conciencia y potencial de los pobladores y autoridades para establecer las condicionantes que pueden fortalecer el arraigo, la valoración y el sentido identitario que protegían a este tipo de poblaciones de una excesiva estandarización o incluso de la criticable “Disneyización” (Bryman, 2016) de muchas poblaciones típicas.

### 3.1.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) tiene como objetivo identificar, cuantificar y describir los diversos impactos ambientales potenciales que surgen durante las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto. Su enfoque radica en rediseñar los productos considerando que los recursos energéticos y las materias primas son finitos y su consumo suele superar la capacidad de reemplazo y aparición de nuevas alternativas. Por tanto, la conservación de los recursos se centra en reducir la cantidad de desechos generados por el producto y, en caso de que se generen, el ACV propone manejarlos de manera sostenible desde una perspectiva ambiental, minimizando los impactos asociados con el sistema de manejo de residuos (Romero, 2003).

El análisis del ciclo de vida evalúa una amplia gama de impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un producto o proceso (extracción, manufactura, empaque y transporte, uso y disposición o reciclaje). Algunos de los impactos ambientales comúnmente evaluados en un ACV incluyen:

- a) Acidificación: considera las emisiones de sustancias que pueden contribuir a la acidificación del suelo, el agua y la atmósfera, causando daños a los ecosistemas y la vida acuática
- B) Eutrofización: Se evalúa el impacto de las emisiones de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, en los cuerpos de agua, lo que puede causar proliferación excesiva de algas y deterioro de la calidad del agua
- C) Cambio climático (*Global-warming potential*): analiza las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), para evaluar su contribución al cambio climático
- d) Oxidación fotoquímica: es el proceso químico en el que los compuestos reaccionan con oxígeno bajo la influencia de la radiación solar, especialmente la radiación UV, lo que conduce a la formación de otros compuestos
- e) Depleción de la capa de ozono: evalúa las emisiones de sustancias agotadoras de la capa de ozono, como los clorofluorocarbonos

(CFC), para determinar su contribución a la reducción de la capa de ozono estratosférica f) Agotamiento de recursos: Se evalúa el uso de recursos naturales no renovables, como minerales y combustibles fósiles, para identificar el agotamiento de estos recursos y su impacto en el medio ambiente (Rieznik, 2023).

#### IV. MARCO REFERENCIAL

En el Estado de México, al igual que en otras latitudes internacionales, por antonomasia el adobe ha sido el material y la principal forma de construir, sobre todo en las zonas rurales.

##### 4.1 ADOBE EN EL ESTADO DE MÉXICO

En el Estado de México, como en otras partes de México y América Latina, el adobe es un material de construcción tradicional que se utiliza para construir casas, edificios y estructuras diversas. En la tabla 8 se contrastan las propiedades mecánicas del adobe (resistencia a la compresión) que se elabora en diferentes municipios del Estado de México:

**Tabla 8.** Resistencia a la compresión del adobe en el Estado de México.

Lugar de origen	Resistencia (MPa)
Amatepec	0.27
El Oro	0.44
Metepec	0.75
San Miguel Totocuitlapilco	0.44
Temascalcingo	0.36
Valle de Bravo	0.42

Fuente: (Miranda, Vancouver, & Vera, 2004).

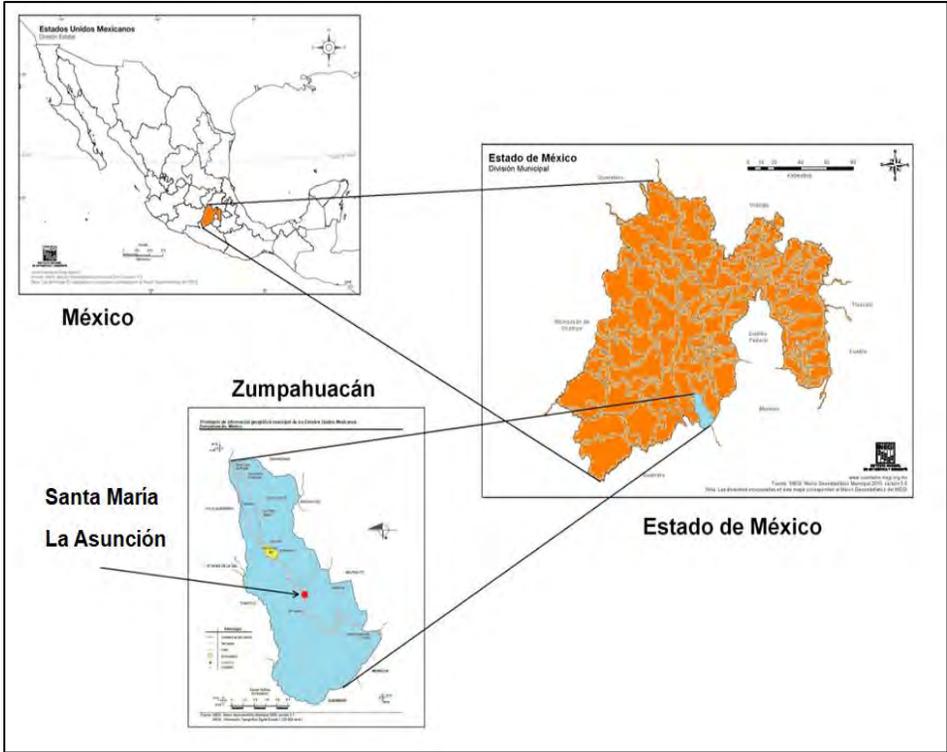
Es notorio observar que incluso en un mismo estado de la república, las características de los adobes son distintas, tanto en geometría, densidad, composición y resistencia.

##### 4.2 ZUMPAHUACÁN, ESTADO DE MÉXICO

Zumpahuacán es uno de los 125 municipios del Estado de México y de la región VII con cabecera en Tenancingo de Degollado. Colinda al norte y noroeste, con Tenancingo; al sur y suroeste, con el estado de Guerrero; al este, con Malinalco; al sudeste, con el estado de Morelos; al oeste, con Tonatico e Ixtapan de la Sal y al noroeste, con Villa Guerrero.

Tiene con una superficie de 201,509 km<sup>2</sup>, siendo su cabecera municipal Zumpahuacán. Representa menos del uno por ciento del territorio del Estado de México (Bando Municipal, 2021). El centro comercial de la región es Tenancingo, lo que hace que las carreteras que comunican sean las más transitadas.

**Figura 13.** Ubicación geográfica de Santa María La Asunción en el contexto del municipio de Zumpahuacán, Estado de México.

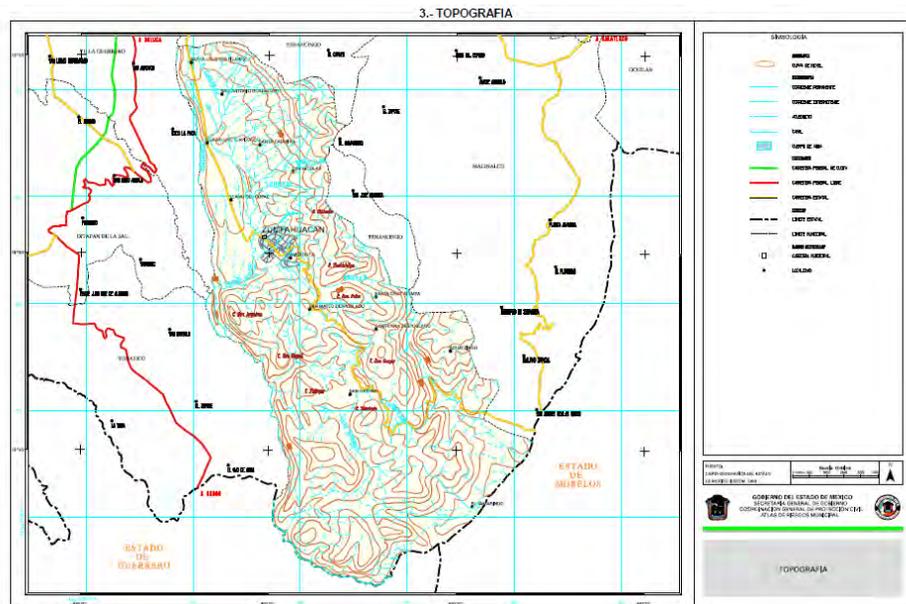


Fuente: Elaboración propia, adaptado de (INEGI, 2009).

**4.2.1 TOPOGRAFÍA**

Zumpahuacán se localiza en una zona rocosa, su altura promedio es de entre 1,939 a 2,800 metros sobre el nivel del mar (msnm). Este municipio se encuentra en una zona montañosa y serrana, la elevación más alta se ubica en el cerro de Totzquihua con 2,800 msnm y la mayoría de los cerros fluctúan entre los 2000 msnm, es decir, se encuentran a una altura promedio de 2,000 a 2.2000 msnm (Gobierno del Estado de México, 2018). La distancia aproximada entre la capital del Estado (Toluca) y Zumpahuacán es de alrededor de 104 kilómetros. Zumpahuacán se encuentra aproximadamente a 90 kilómetros al suroeste de la Ciudad de México.

**Figura 14.** Topografía del municipio.



Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018)

De acuerdo al Atlas de Riesgos de Zumpahuacán (2018), los suelos de dicho municipio están clasificados de la siguiente manera:

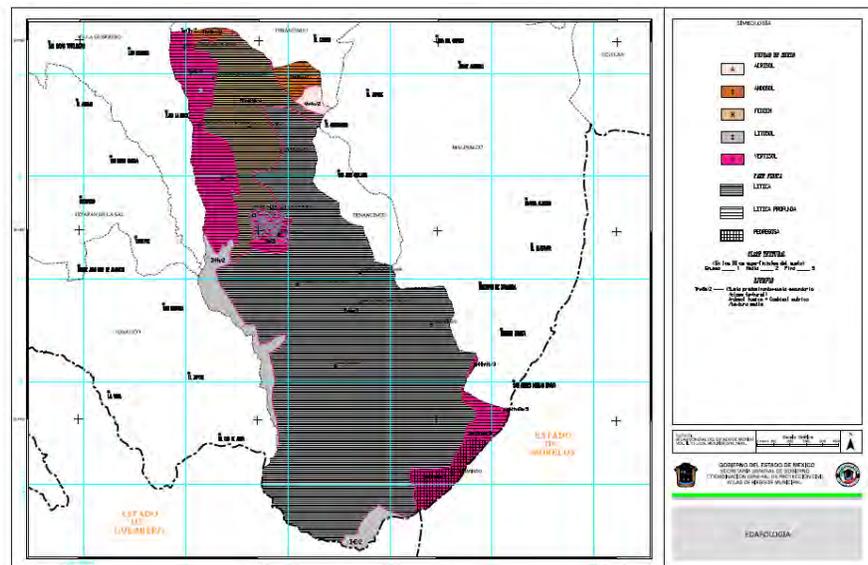
- a) Andosol: Es el suelo negro que hay en las zonas volcánicas y alrededores. Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, sobre un 20 %, además tienen una gran capacidad de retención de agua y mucha capacidad de cambio. Este tipo de suelo arcilloso es ideal para la elaboración de elementos arquitectónicos de tierra, como el adobe.
- b) Litosol: es prácticamente una formación rocosa, lo que impone limitaciones significativas para su empleo en entornos urbanos debido a su escaso potencial de excavación. Además, se encuentra localizado en áreas de fuertes pendientes.
- c) Rendzina: se desarrollan sobre rocas madre carbonatadas, como la caliza, y son el resultado común de procesos erosivos. En esta zona, se encuentran diversas minas explotando calizas.
- d) Feozem: presentan una fertilidad similar o incluso superior a la de los vertisoles. Estos suelos son ricos en materia orgánica, tienen una textura media y cuentan con buen drenaje y ventilación. En general, son poco profundos y suelen contener abundantes piedras, lo que los hace altamente inestables. Esto limita su empleo en la agricultura a largo plazo, aunque pueden ser usados para la cría de pastos. Se recomienda mantener una cubierta vegetal constante en estos suelos.
- e) Vertisol: Se forma comúnmente de rocas altamente básicas tales como basalto en climas estacionalmente húmedos o sujetos a sequías esporádicas y a inundaciones. La

contracción y expansión de las arcillas del vertisol perjudican construcciones y carreteras, obligando a costosas reparaciones. Las tierras con vertisoles se usan generalmente para pastoreo.

f) Acrisol: estos suelos se desarrollan principalmente de efectos de transformación de rocas ácidas, con altos niveles de arcillas, las cuales pueden sufrir posteriores degradaciones. Predominan en superficies con una topografía ondulada o colindada, con un clima tropical húmedo, monzónico, subtropical o muy cálido. No son muy productivos salvo para especies de baja demanda y tolerantes a la acidez como la piña, caucho o palma de aceite. (Gobierno del Estado de México, 2018).

En la figura 15 se observa un mapa con la distribución de los tipos de suelo del municipio de Zumpahuacán.

**Figura 15.** Tipos de suelo del municipio.

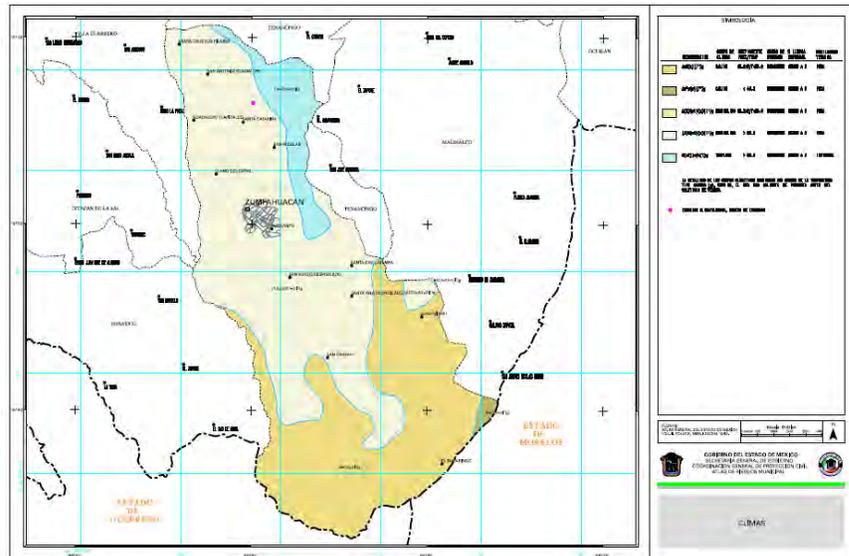


Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018).

#### 4.2.2 CLIMA

El municipio de Zumpahuacán comprende diversos microclimas, el clima "templado semicálido subhúmedo" es el más predominante, cuenta con una precipitación invernal menor al 5% con escasa variación térmica, en la escala climática de Köppen estos microclimas son AC, W1, W2. Las temperaturas más altas se registran antes del solsticio de verano y en general consta de una temperatura media anual de 14°C, localizándose este clima en las poblaciones de San Antonio, La Cruz, San Pablo y San Miguel Zumpahuacán.

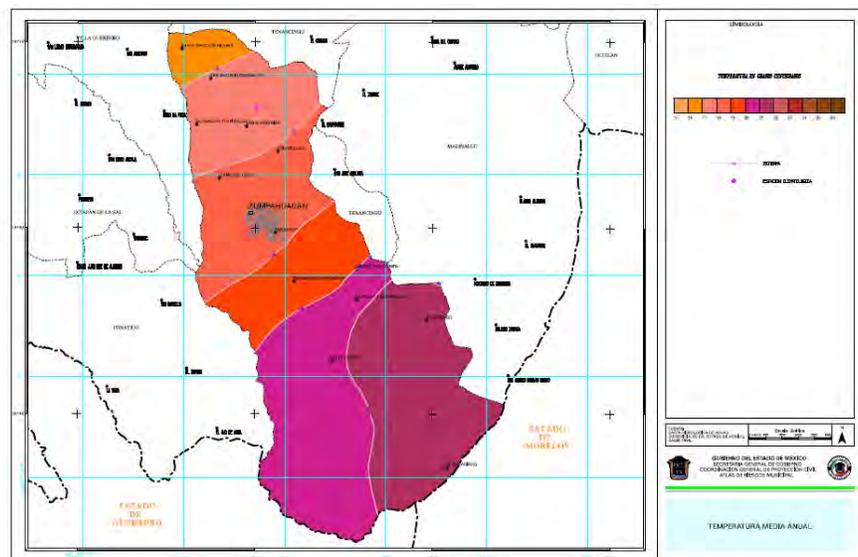
**Figura 16.** Climas presentes en el municipio.



Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018).

En cuanto a la precipitación pluvial, se considera que gran parte de las lluvias son de verano con un régimen pluvial promedio de 650 mm; el mes más lluvioso es junio y en febrero se observa la mínima precipitación. En el siguiente mapa se pueden observar las temperaturas medias del municipio. Las temperaturas varían con las temporadas estacionales, sin embargo, la mayor del parte del año el norte presenta temperaturas templadas y el sur más cálidas.

**Figura 17.** Temperatura media anual del municipio.



Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018).

### 4.2.3 DEMOGRAFÍA

El municipio de Zumpahuacán se integra para el cumplimiento de las funciones políticas y administrativas en localidades, establecidas dentro del territorio Municipal. La siguiente tabla muestra esta división administrativa:

**Tabla 9.** Distribución administrativa de Zumpahuacán

Categoría administrativa	Total
Cabecera municipal (8 barrios)	1
Localidades	20
Caseríos	4
Tota General	32

Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018).

La cabecera municipal se divide en 8 barrios, los cuales son: 1. San Juan, 2. Zumpahuacán, 3. La Ascensión, 4. San Pedro, 5. San Mateo, 6. San Agustín, 7. San Miguel, 8. Santa Ana. El resto del municipio se divide en 32 localidades que se clasifican en pueblos, rancherías, cuadrillas, colonias, barrios y caseríos. (Gobierno del Estado de México, 2018).

Con información de la encuesta intercensal del INEGI en 2015, la población del municipio es de 16, 927 habitantes, de los cuales 8,858 son mujeres y 8,069 hombres. En la subsecuente tabla se especifican las características de la población:

**Tabla 10.** Población por edad y sexo

Población total por grandes grupos de edad según sexo, 2015			
Edad	Hombres	Mujeres	Total
0-4 años	981	945	1,926
5-14 años	1,936	1,883	3,816
15-64 años	4,598	5,371	9,969
65 o + años	542	645	1,190
No especificado	12	14	26
Total	8,069	8,858	16,927

Fuente: (Gobierno del Estado de México, 2018).

### 4.2.4 ACTIVIDADES ECONÓMICAS

Zumpahuacán se erige como un municipio de carácter rural cuya actividad central se concentra en la agricultura. Según el Atlas de Riesgos de Zumpahuacán (2016-2018),

esta ocupación abarca un imponente 89.40% de la extensión territorial. En específico, su cultivo principal es el maíz, donde la agricultura de temporal ocupa un destacado 78.61% de la actividad total, mientras que la modalidad de riego constituye el 8.81%. En términos económicos, Zumpahuacán se halla firmemente ligado al municipio de Tenancingo, ya que en este último se lleva a cabo la producción, distribución y comercialización de los productos del primero, además de brindar servicios de salud y administración pública. La agricultura se erige como el pilar económico fundamental de este municipio, y la implantación de invernaderos productores, como el caso de Zumpaflores, emerge como una fuente destacada de empleo. Un aproximado de 900 personas laboran en los múltiples invernaderos presentes en el municipio. Por otro lado, en las comunidades asentadas en las zonas montañosas, en particular en San Gaspar, la producción integral del mezcal ejerce un rol predominante. Con 23 alambiques productores en funcionamiento, se generan alrededor de 1,400 empleos temporales anuales.

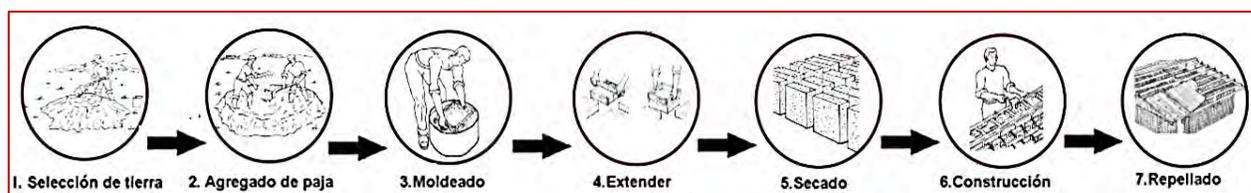
#### 4.2.5 ADOBE EN LA REGIÓN

De acuerdo al Plan Municipal de Desarrollo del municipio de Zumpahuacán (2019), del total de viviendas, el 78.67 % utilizan como material predominante en paredes el tabique, piedra ladrillo, block; seguido por el adobe con el 8.67 %, con el 11.7% lamina de asbesto o metálica, bambú, carrizo o palma, por último, el resto de los materiales no especificados ocupan el 0.52 %.

Al ser un lugar con una rica historia de construcciones con adobe, es posible localizar diversas adoberas en la región, así mismo, cerca del municipio colindante de Tenancingo se pueden encontrar una gran cantidad de casas de materiales para la construcción. Algunos talleres forman parte de cooperativas mientras que otros son negocios familiares.

El proceso de elaboración del adobe puede variar ligeramente dependiendo de la región y de los materiales disponibles, los pasos 6 y 7 corresponden a la construcción y renovación.

**Figura 18.** Proceso para elaboración de adobe.



Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente lista se mencionan las fases del proceso de elaboración de adobe en esta zona geográfica:

1. Selección de la tierra: el primer paso consiste seleccionar una tierra adecuada (libre de materia orgánica). Es recomendable que el suelo contenga arcilla en una proporción del 25 al 35%, arena fina y limo. El suelo extraído se pasa a través de un tamiz para eliminar piedras, grava y otros materiales grandes. Esto asegura que la mezcla de adobe tenga una consistencia uniforme.

**Figura 19.** Taller de adobe.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

2. Mezcla y agregado de pasto seco: las fibras naturales se mezclan en un montón con la arena y arcilla en seco, para luego agregar agua hasta obtener una mezcla homogénea. El amasado puede realizarse con las manos o con herramientas como palas o rastrillos. Típicamente, el adobe ideal se compone de 70% arena, y 30% arcilla.

3. Moldeado: la mezcla se coloca en moldes de madera o metal y se compacta para obtener bloques de adobe uniformes. También se pueden usar moldes manuales hechos de plástico o madera.

4. Extender: se desmoldan los bloques y se colocan en una superficie plana y de cara al sol.

**Figura 20.** Mezcla para elaboración de adobe.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

5. Secado: los bloques de adobe se colocan al sol y al viento durante aproximadamente 2 a 3 semanas hasta que se sequen completamente. Deben secarse con la cara frontal algunos días, después de canto y viceversa, esto para lograr un secado uniforme. Si los bloques de adobe no se secan correctamente, pueden agrietarse o desmoronarse. Después del secado, los adobes se curan (lo cual consiste en permitir que los bloques o paredes de adobe se sequen y endurezcan adecuadamente) durante al menos un mes para alcanzar su resistencia óptima. Durante este período, los adobes se almacenan en un lugar protegido de la lluvia y la humedad excesiva.

6. Construcción: una vez que los bloques de adobe están secos, se pueden cortar o pulir para obtener una forma más uniforme y lisa, para agregar a los muros.

7. Repellado: en caso de requerir mantenimiento o un acabado liso en los muros, se puede emplear la técnica del repellado, la cual se prepara con una proporción adecuada de arena, cemento, agua y aditivos, y se aplica sobre la pared con una herramienta plana. El repellado no solo mejora la apariencia estética de las paredes, sino que también las protege contra la humedad y el deterioro.

8. Reutilización: el adobe reusado también puede usarse en la construcción de nuevos edificios. Los ladrillos de adobe se pueden limpiar, reacondicionar y utilizar como material de construcción en proyectos arquitectónicos frescos. Esto ayuda a reducir el consumo de nuevos recursos y a preservar la tradición constructiva.

De acuerdo al maestro adobero Vieira la mezcla del adobe tradicional de dicha región está compuesta por un 80% arena, 20% arcilla, pasto seco y agua, es decir, para fabricar 6 bloques de adobe son indispensables 2 carretillas repletas de arena (180 kg) por

una carretilla de arcilla (60 kg), 3 cubetas de agua (58 lts) y 36 puños de pasto seco (2 kg). Típicamente la mezcla se compone de un 80% arena y un 20% arcilla, del total de dicha mezcla se agrega un 19.4% de agua y un 15% de fibras naturales (zacate) del peso total de la mezcla arena-arcilla.

**Figura 21.** Adobes listos para la construcción.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

#### 4.2.6 AGAVE EN LA REGIÓN

La Asociación de Productores de destilados de agave de Zumpahuacán S.C. de E.L. de C.V., rige la producción, distribución y comercialización del mezcal. Esta misma asociación se encarga de asegurar que todas las fases productivas se llevan a cabo conforme las medidas de calidad, seguridad y sanidad correspondientes. Desde el alambre de púas para el cercado del maguey, hasta los combustibles de cocción de las piñas y los contenedores de plástico de grado alimenticio para fermentación, el envasado y el etiquetado.

Con base en datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2005-2006, la producción de mezcal en la región fue la siguiente:

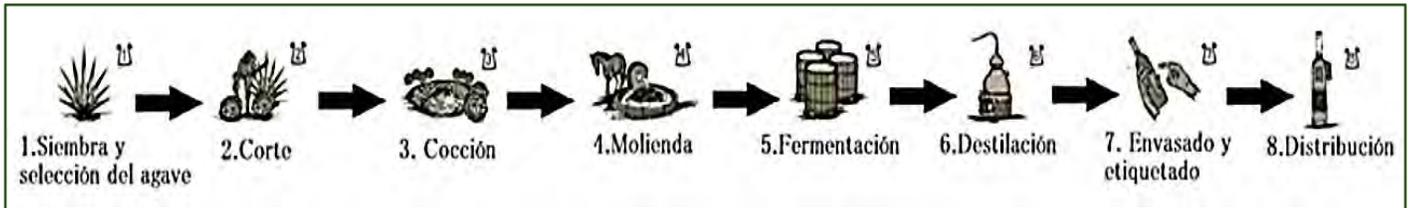
**Tabla 11.** Producción de mezcal en la región.

Año	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio Medio Rural (\$/Ton)	Valor de producción (Pesos \$)
2005	6	6	300	50	2,000	600,000
2006	3	3	120	40	3,000	360,000

Fuente: (SIAP, 2006).

Es importante tener en cuenta que el proceso de elaboración del mezcal puede variar dependiendo de la región, la materia prima disponible y la tradición. La siguiente figura muestra el proceso tradicional de esta región:

**Figura 22.** Proceso de elaboración del mezcal.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se enlistan las etapas de este proceso en el municipio de Zumpahuacán:

1. Siembra y selección del agave: El proceso comienza con la selección de agave maduro y saludable. El agave puede tardar varios años en madurar y se selecciona cuidadosamente para garantizar la calidad del mezcal. La mayoría de las especies de agave alcanzan la madurez y están listas para la reproducción entre los 5 y los 10 años de edad, en esta zona la maduración dura aproximadamente 7 años. Dependiendo de la especie, las hojas pueden variar en forma, tamaño y color. Algunas variedades de agave silvestre pueden alcanzar alturas considerables, mientras que otras son más pequeñas y compactas.

**Figura 23.** Agaves silvestres.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

2. Corte: el corte del agave se realiza con una herramienta llamada "coa". La coa es una especie de machete largo y curvo que se utiliza para cortar las hojas de la planta de agave cerca del corazón. El corazón del agave se llama "piña" debido a su forma redonda

**Figura 24.** Horno de tierra.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

3. Cocción: el agave se cocina en hornos subterráneos llamados "hornos de tierra" o en ollas de acero inoxidable durante varios días. Durante este proceso, el almidón del agave se convierte en azúcares fermentables.

**Figura 25.** Quema de piñas.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

4. Molienda: después de cocinar el agave, se muele para obtener el jugo de agave. Tradicionalmente, el agave se molía con una muela de piedra tirada por un caballo, pero hoy en día se utilizan molinos mecánicos.

**Figura 26.** Sobrantes del horneado.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

5. Fermentación: El jugo de agave se coloca en grandes recipientes de madera o acero inoxidable para fermentar durante varios días.

6. Destilación: Después de la fermentación, el líquido se destila dos veces en alambiques de cobre. Durante el proceso de destilación, se separan los componentes del mezcal y se obtiene el alcohol puro. En esta mezcalería se emplea un tronco de Cascomite vacío por donde sube el vapor del aguamiel hasta los alambiques de cobre.

**Figura 27.** Taller de elaboración de mezcal.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

7. Envasado y etiquetado: después de dejar macerar el mezcal, se filtra y se embotella. En algunos casos, se agregan otros ingredientes como frutas, especias y hierbas para crear diferentes sabores. Por último se etiquetan para su venta.

8. Distribución: las botellas son transportadas a restaurantes y establecimientos para su comercialización.

**Figura 28.** Envasado y etiquetado.



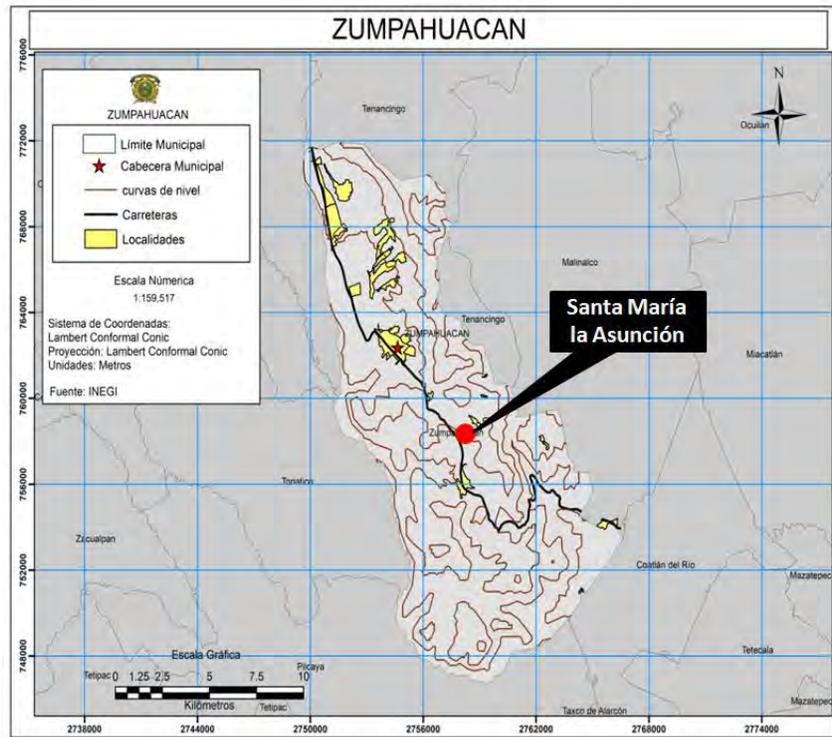
Fuente: Archivo fotográfico personal.

#### **4.2.7 SANTA MARÍA LA ASUNCIÓN**

Al sureste del municipio de Zumpahuacán y a escasos 8 kilómetros de la cabecera municipal se encuentra la comunidad de Santa María la Asunción, con una altitud de 1840 metros sobre el nivel del mar.

Esta pequeña localidad cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 14°C. Santa María la Asunción es una comunidad rural que ha ido creciendo demográficamente, al año 2005 contaba con 319 habitantes y actualmente 600 habitantes aproximadamente.

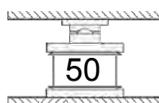
**Figura 29.** Ubicación geográfica de Santa María La Asunción, Zumpahuacán, Edo. Méx.



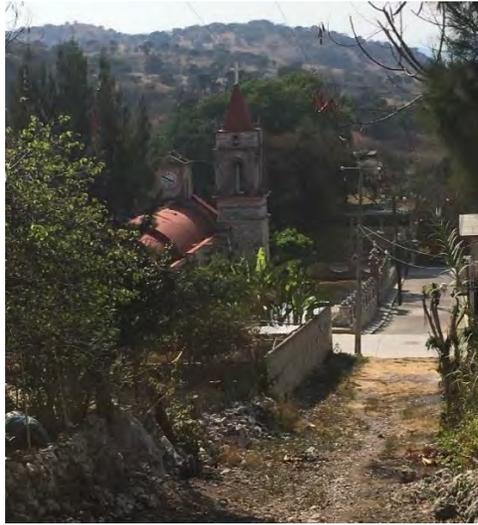
Fuente: Elaboración propia con mapas de (INEGI, 2009).

Para obtener productos de calidad y educación de nivel superior la población tiene que emigrar a la cabecera municipal o al municipio de Tenancingo. El centro urbano y comercial del municipio es Tenancingo, el cual se encuentra a 23 kilómetros de esta localidad.

En esta comunidad se pueden observar viviendas de todo tipo, principalmente de adobe, otras de block gris y algunas de concreto. Al día de hoy, se ha observado un aumento en la utilización de diversos materiales constructivos, tales como bloques, láminas y polímeros. La actividad primordial en esta localidad gira en torno a la agricultura, con cultivos de maíz, frijol y calabaza. Además, se destaca la industria del mezcal, en la que operan 23 productoras, así como la industria minera centrada en la extracción de cal y arena. A escasos kilómetros del corazón de Santa María la Asunción, emerge la región de producción de mezcal, donde cada destilería es gestionada por un maestro mezcalillero distinto y sus familias.



**Figura 30.** Templo de Santa María la Asunción.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

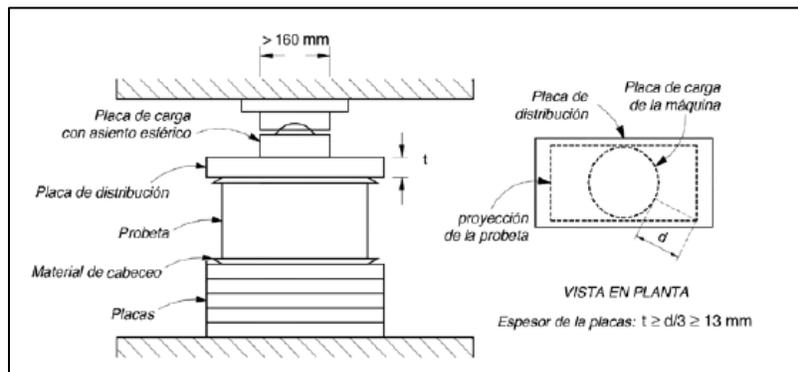
## V. MARCO NORMATIVO

### 5.1 NORMAS MEXICANAS DE CONSTRUCCIÓN

En México, las normas técnicas de construcción son emitidas por la Secretaría de Economía y se conocen como Normas Oficiales Mexicanas (NOM), estas normas son certificadas por la Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). Algunas de las principales normas que regulan la industria de la construcción en México y que son pertinentes a esta investigación son:

NMX-C-036-ONNCCE-2013: Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines (Mampostería - Método de ensayo) (ONNCCE, 2013).

**Figura 31.** Prueba a la compresión.

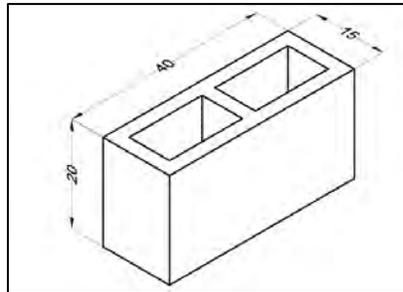


Fuente: (ONNCCE, 2004).

NMX-C-037-ONNCCE-2004: Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines (Industria de la Construcción – Mampostería — Método de Ensayo) (ONNCCE, 2004).

NMX-C-038-ONNCCE-2013: Determinación de las Dimensiones de Bloques (Industria de la Construcción - Mampostería -, Tabiques o Ladrillos y Tabicones - Método de Ensayo) (ONNCCE, 2013).

**Figura 32.** Medidas de los bloques.



Fuente: (ONNCCE, 2012).

NMX-C-404-ONNCCE-2012: Fabricación de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo, absorción de agua y secado (Industria de la construcción – Mampostería) (ONNCCE, 2012).

NMX-C-441-ONNCCE -2005: Industria de la construcción-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural-Especificaciones (ONNCCE, 2005).

NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la construcción - Mampostería - Determinación de la resistencia a compresión de cilindros y cubos- Métodos de ensayo (ONNCCE, 2014).

## 5.2 NORMAS INTERNACIONALES DE CONSTRUCCIÓN

Perú, Chile, Nueva Zelanda, Estados Unidos y otros países tienen una amplia gama de normativas en relación a la construcción con tierra. Dichos países lideran en este tipo de arquitectura debido a aspectos culturales y geográficos, entre otros. Seguidamente se muestran las normas internacionales de la construcción pertinentes para esta investigación:

NORMA NTE-E.080: Esta norma tiene como objetivo la regulación del uso del adobe simple o estabilizado como unidad para la construcción de albañilería, incluyendo sus características, comportamiento y diseño. Su propósito es diseñar edificaciones de interés social y bajo costo que resistan las acciones sísmicas, evitando el colapso frágil.

Como se mencionó anteriormente, esta norma busca mejorar el sistema constructivo actual utilizando adobe, tomando en cuenta la realidad de las construcciones de este tipo

existentes en la costa y la sierra. Cualquier proyecto que se elabore utilizando criterios diferentes a los considerados en esta norma, deberá estar respaldado por un estudio técnico (Norma Técnica de Edificación NTE E.080, 2000).

NMAC-14.7.4-2015 (New Mexico Earthen Building Materials Code): tiene como objetivo garantizar la seguridad y la calidad de las construcciones de adobe en el estado de Nuevo México, promoviendo técnicas de construcción adecuadas y asegurando que los edificios cumplan con los estándares de construcción necesarios.

Algunos de los requisitos que establece el código son:

1. El material de tierra utilizado en la construcción debe ser adecuado y no debe contener impurezas o contaminantes que puedan afectar la calidad o la estabilidad del adobe.
2. El adobe debe tener una resistencia adecuada para soportar las cargas y los esfuerzos que se producen durante la construcción y en la vida útil del edificio.
3. El diseño y la construcción de las paredes de adobe deben cumplir con ciertas especificaciones, como la altura máxima permitida, el espesor mínimo de las paredes y la distancia mínima entre los pilares de refuerzo.
4. Se deben utilizar técnicas de construcción adecuadas para garantizar la estabilidad y la durabilidad del edificio, como la colocación de pilares de refuerzo, la utilización de morteros adecuados y la aplicación de acabados protectores.
5. El código también establece los requisitos para la instalación de techos, ventanas, puertas y otros elementos estructurales en los edificios de adobe (NMAC, 2015).

## VI. MARCO METODOLÓGICO

La ruta metodológica de la presente investigación contempla dos análisis: uno cualitativo y otro cuantitativo. Regido por la epistemología de la sustentabilidad y el patrimonio arquitectónico de tierra. Es decir, parcialmente con un modelo técnico por la recolección de datos, tablas y análisis y otra parte conceptual, ya que se estudiará este material desde la perspectiva social, ambiental y económica.

La naturaleza de la investigación abarca tanto el ámbito básico como el aplicado. La vertiente básica implica la recopilación de conocimientos referentes a los temas a ser desarrollados, mientras que la vertiente aplicada entra en juego al utilizar dichos conocimientos en el contexto del campo de la construcción. Las técnicas de recolección de datos son primeramente documentales, por la revisión de textos, manuales, reglamentos, artículos, estadísticas e instrumentos de medición tales como: higrómetros, termómetros, tamices, prensas, hornos, matraces, moldes, entre otros. Principalmente se utilizó el método deductivo, ya que se partirá de lo general, estudiando poblaciones con arquitectura de tierra, a lo particular, los materiales de construcción como el adobe con agave y ceniza. La intención es que este enfoque sea vanguardista, ya que los experimentos propuestos aportarán conocimientos novedosos. Aunque se han llevado a cabo numerosas investigaciones en relación con la utilización de distintos elementos en la construcción con adobe, como fibras naturales o sintéticas, se ha explorado poco en lo referente a la inclusión de subproductos derivados del agave mexicano (*angustifolia Haw*) (Ruiz-Serrano, 2019).

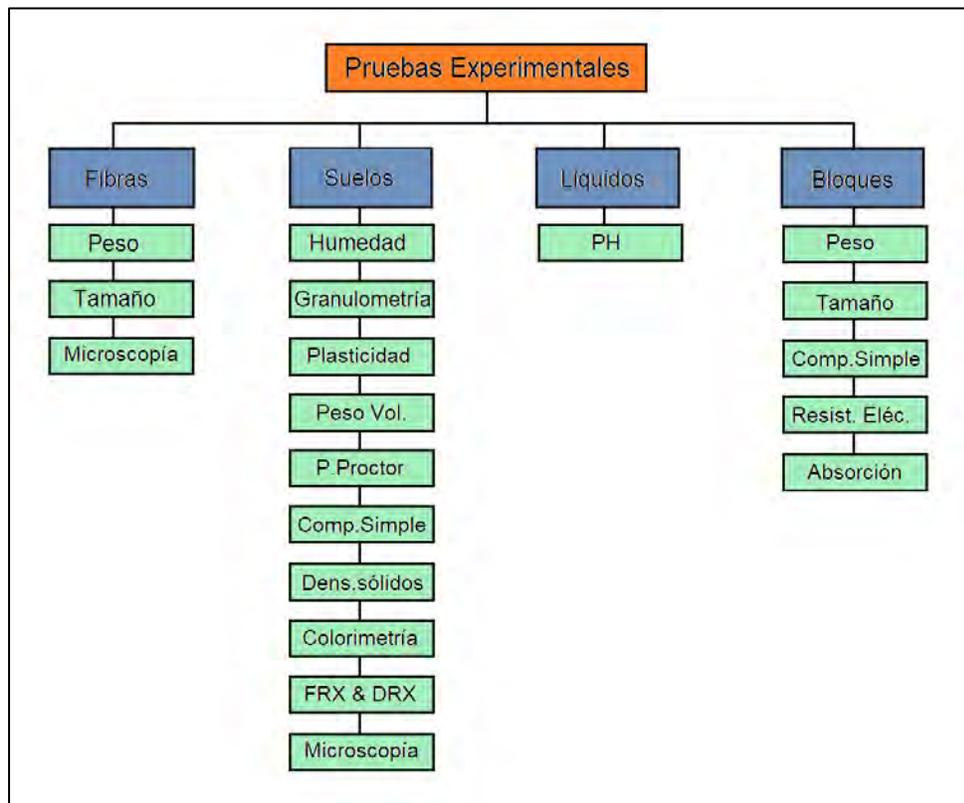
La metodología empleada para desarrollar nuevos materiales de construcción a partir de los subproductos del agave podría ser adaptada para la creación de compuestos naturales a partir de excedentes agrícolas específicos de una región en particular. Esto resulta particularmente relevante en el contexto mexicano, dada la abundancia de recursos naturales en el país. La incorporación de la Industria Tequilera o Mezcalera desempeña un papel fundamental y estratégico, ya que posibilita la difusión y comunicación de los avances de este proyecto, asegurando tanto el interés de la industria como el suministro de materia prima para la producción de los biocompositos. En una segunda etapa se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV) de dicha propuesta constructiva, esto para evaluar el impacto ambiental de este nuevo producto a lo largo de su ciclo de vida completo, es decir, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

En materia experimental, las pruebas llevarán el siguiente orden:

1.- Caracterización de la mezcla: peso, tamaño y microscopía de las fibras; humedad, granulometría, plasticidad, peso volumétrico, prueba Proctor, compresión simple, densidad de sólidos, colorimetría, difracción y fluorescencia de rayos x, microscopía de suelos y pH del agua de la mezcla. 2.-Pruebas a bloques: peso, tamaño, compresión simple, resistividad eléctrica y absorción.

Las pruebas mencionadas anteriormente se expresan en el siguiente diagrama.

**Figura 33.** Pruebas experimentales.



Fuente: Elaboración propia.

## 6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

En general, cualquier fibra se caracteriza por su composición química, estructura, longitud de fibra, tensión, capacidad de absorción de agua, peso, entre otros. En el proceso de la elaboración del mezcal se obtienen dos tipos de fibras, las recolectadas de las hojas al hacer el rapado (comúnmente empleadas para sogas o textiles de ixtle) y el bagazo de agave, subproducto de la molienda y fermentación (se desecha, se acumula en el predio o en algunas ocasiones se emplea como abono natural).

**Figura 34.** Cultivo de agaves.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### **6.1.1 BAGAZO DE AGAVE (ANGUSTIFOLIA HAW)**

El bagazo de agave es un subproducto de la producción de tequila o mezcal. Se refiere a las fibras, pulpa y restos de agave que quedan después de moler y extraer el jugo de la planta para la fermentación y destilación.

**Figura 35.** Conjunto de bagazo de agave.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

El bagazo de agave es una fuente importante de materias orgánicas y nutrientes que pueden ser reciclados y reutilizados, lo que contribuye a reducir los desechos y a mejorar la sostenibilidad en la producción de tequila y mezcal.

### 6.1.1.1 PESO Y TAMAÑO

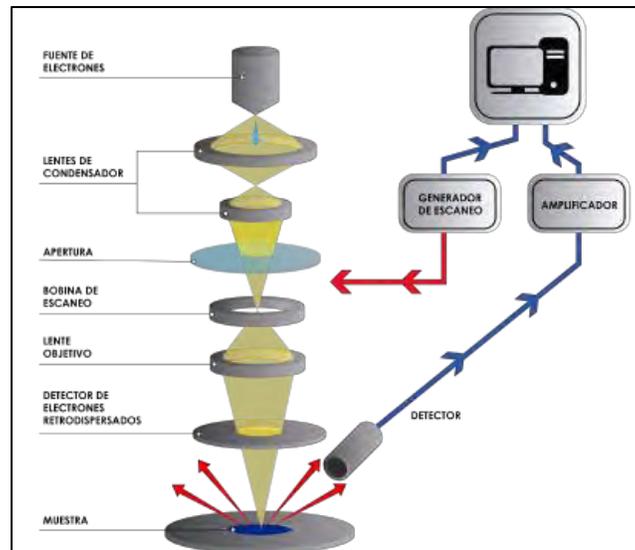
El tamaño de partícula de la fibra es importante porque influye en su capacidad de absorción y como aglutinante en la mezcla de los adobes. En general, las fibras más finas tienen una mayor capacidad de absorción, pero también pueden ser más difíciles de manejar. Las fibras se medirán con el uso de un vernier para después de numerosas mediciones obtener un promedio.

El peso de las fibras en un adobe es importante porque puede afectar su resistencia y durabilidad. En general, se recomienda utilizar entre un 2% y un 5% en peso de las fibras con respecto al bloque de adobe y así obtener una mezcla adecuada que proporcione la resistencia y durabilidad necesarias. Las fibras se pesaron con el uso de una granataria Ohaus para después obtener un promedio.

### 6.1.1.2 MICROSCOPIA DE BARRIDO

La microscopía de barrido electrónico (SEM, Scanning Electron Microscope), es una técnica que utiliza electrones para generar imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra incluso a niveles nanométricos (Ipohorsky, 2011).

**Figura 36.** Diagrama anatómico de microscopía de barrido.



Fuente: (Metalinspec, 2022)

En un SEM, un haz de electrones se enfoca en la superficie de la muestra, que puede ser una amplia variedad de materiales, desde células biológicas hasta metales y materiales sintéticos. A medida que el haz de electrones interactúa con la superficie de la muestra, se producen varios tipos de señales, como electrones secundarios, rayos X y

retrodispersión de electrones. Estas señales son decodificadas por un detector y se utilizan para generar una imagen de la superficie de la muestra en una computadora.

Mediante la microscopía óptica, es posible observar la forma, el tamaño y la estructura de las fibras, así como identificar características como la presencia de nudos, irregularidades o impurezas.

Las observaciones del microscopio electrónico de barrido (SEM) se realizaron en un microscopio JSM-6510LV de JEOL equipado con un espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (EDS) Bruker QUANTAX 200 para la caracterización elemental. Antes de la adquisición de imágenes SEM, los materiales se unieron a un trozo de aluminio utilizando cinta conductora de carbono de doble barra y finalmente recubierto con una fina capa de oro utilizando una cámara de pulverización Denton IV dentro del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) de la Universidad Autónoma del Estado de México.

## **6.2 CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDOS**

La caracterización de líquidos se refiere al proceso de identificar y describir las propiedades físicas y químicas de un líquido en particular. Esto puede incluir propiedades como la densidad, la viscosidad, la tensión superficial, la conductividad térmica y eléctrica, el pH, el punto de ebullición y el punto de fusión, entre otras. Para esta investigación únicamente se caracterizó el pH del agua a emplear en la mezcla de adobes.

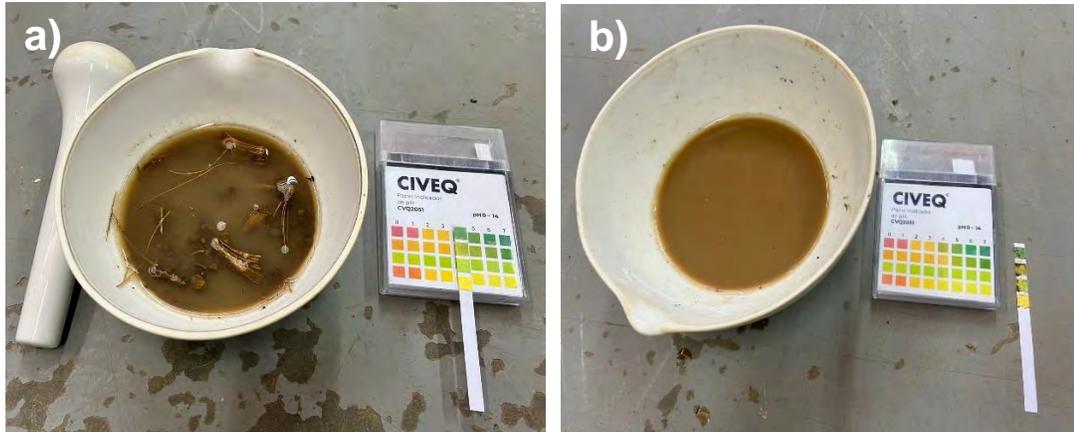
### **6.2.1 POTENCIAL HIDRÓGENO**

El potencial Hidrógeno (pH) es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. Es una escala logarítmica que varía de 0 a 14, donde 0 es extremadamente ácido, 7 es neutro y 14 es extremadamente alcalino. Se basa en la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en una solución. Las soluciones ácidas tienen una mayor concentración de iones de hidrógeno que las soluciones alcalinas.

El pH del agua para la mezcla de adobe se midió utilizando la aplicación de tiras reactivas químicas conocidas como indicadores de pH que cambian de color dependiendo el potencial Hidrógeno de la solución. Si el agua utilizada en la fabricación de adobe tiene un pH muy ácido o muy alcalino, puede afectar negativamente la calidad del adobe y su capacidad de resistir las condiciones ambientales. Por ejemplo, si el agua es demasiado ácida, puede disminuir la resistencia del adobe y provocar la descomposición de sus componentes orgánicos. Por otro lado, si el agua es demasiado alcalina, puede causar una

acumulación de sales en la superficie del adobe y disminuir su capacidad de resistir la lluvia y la erosión.

**Figura 37.** Aplicación de tiras reactivas pH a la mezcla de bagazo (a) y arcilla (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.3 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

Los suelos se pueden caracterizar por sus cualidades físicas, químicas o biológicas. En el laboratorio de suelos se realizan pruebas para medir la densidad, la textura, la capacidad de retener agua, la capacidad de absorción, la estructura, la composición química y otros aspectos importantes del suelo. Estos resultados se utilizan para determinar la fertilidad del suelo, evaluar la susceptibilidad a la erosión, compresibilidad, entre otros factores.

El trabajo experimental de esta investigación se realizó principalmente en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. Este laboratorio cuenta con diversas áreas, las que incluyen un laboratorio de suelos, de resistencia de materiales, museo de geología, entre otros. Estos laboratorios están equipados con tecnología avanzada y están dirigidos por profesionales altamente capacitados.

**Figura 38.** Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas.



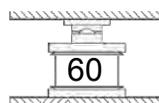
Fuente: Archivo fotográfico personal.

Estos laboratorios proporcionan información valiosa para la toma de decisiones en la, construcción, agricultura, la planificación del medio ambiente y otros campos relacionados con el suelo.

**Figura 39.** Equipo experimental del laboratorio de suelos.



Fuente: Archivo fotográfico personal.



### 6.3.1 TIPOS DE SUELOS

Para la conformación de adobe se recurrió a los siguientes suelos:

Arcilla: es un tipo de suelo sedimentario compuesto principalmente por partículas de tamaño muy fino y con una textura suave y pegajosa al tacto. Se compone principalmente de silicatos de aluminio hidratados ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y otros minerales como cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), feldespato ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y mica ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ). La arcilla es un material importante para la construcción, ya que puede ser utilizada para crear morteros y adhesivos de alta calidad.

**Figura 40.** Separación, identificación (a) y pesaje de suelos (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Arena: está compuesta principalmente de sílice (también conocido como dióxido de silicio), que es un compuesto químico compuesto por átomos de silicio y oxígeno ( $\text{SiO}_2$ ). Además de la sílice, la arena puede contener otros minerales como feldespato ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), mica ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y otros óxidos ( $\text{M}_2\text{O}_x$ ) e hidróxidos metálicos ( $\text{MOH}_x$ ) como hierro, aluminio y titanio. Estos minerales pueden dar a la arena un color y una textura únicos, así como propiedades físicas y químicas distintas. Por ejemplo: en su composición química, reactividad química, capacidad para retener agua, dureza y abrasividad, forma de las partículas, compactación, capacidad de drenaje, cohesión y plasticidad.

**Figura 41.** Muestreo (a) y pesaje de arcilla (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Cenizas: son los restos sólidos que quedan después de quemar algo, ya sea de origen orgánico como madera o inorgánico como el carbón mineral. La ceniza utilizada en la elaboración del mezcal se obtiene de la quema de la madera principalmente de encino, sin embargo, dependiendo la región puede agregarse otras especies forestales. En particular, en Santa María la Asunción no se tiene un aprovechamiento potencial de dicha ceniza, la cual únicamente se apila en una zona del terreno. Ocasionalmente, algunos productores extienden parte de esta ceniza para aportar nutrientes al suelo para cultivo. Para el muestreo de ceniza se emplearon bolsas de plástico herméticas y cubetas para su transporte. Las cenizas se obtuvieron directamente del predio de la mezcalera.

**Figura 42.** Cenizas in situ (a) y en laboratorio (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.3.2 PROPIEDADES NATURALES

Dentro de las propiedades naturales de cada material el contenido de agua en el suelo es importante para la construcción, ya que puede afectar la estabilidad y la capacidad de carga del mismo. Si el contenido de agua en el suelo es demasiado alto, el suelo puede volverse inestable y no ser adecuado para la construcción. Si el contenido de agua es demasiado bajo, el suelo puede ser demasiado seco y frágil, lo que puede afectar la capacidad del suelo para soportar cargas. Para poder realizar cualquier caracterización de suelos primero es necesario hacer un buen muestreo, el cual consiste en hacer una pequeña excavación cuadrada de aproximadamente 20 cm de lado, depositar la muestra en una bolsa de plástico colocando dentro de ella una etiqueta que contenga toda la información del sondeo realizado.

**Figura 43.** Clasificación (a) y secado al sol (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Después es importante secar al sol (extendiendo con un rastrillo o pala) y disgregar el material cuando es necesario, esto usando pisonos de concreto o martillos. Por último separar terrones de gran tamaño manualmente, lavar y pesar para finalmente con estos datos obtener el contenido de agua natural del lugar donde se extrajo la muestra. Las siguientes formulas son de utilidad para obtener el porcentaje de contenido de agua de la zona de extracción:

$$W_w = W_h - W_s \quad (1)$$

Dónde:  $W_w$ = Peso del agua (gr),  $W_h$ =Peso húmedo (gr),  $W_s$ =Peso seco (gr)

$$\%W = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (2)$$

$\%W$ = Contenido de agua natural de la muestra (%)

El contenido de agua en el suelo también puede afectar la compactación del mismo y la expansión y contracción del mismo, factores importantes a considerar en la construcción de edificios y estructuras. Si el contenido de agua en el suelo es demasiado alto, puede afectar la calidad de la construcción y la estabilidad a largo plazo. Una alta expansión y/o contracción debido a los cambios en el contenido de agua puede comprometer la firmeza y la integridad de la construcción.

Dicho lo anterior, es esencial realizar una evaluación adecuada del contenido de agua en el suelo antes de comenzar a edificar con ciertos materiales para construcción.

En la figura 44 se observa parte del secado en estufa (más veloz que al sol), se le puede colocar un vidrio de Petri para observar si todavía presenta humedad al condensarse las gotas, en la otra figura el disgregado manual de las muestras.

**Figura 44.** Secado en hornilla (a) y disgregado (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

**Figura 45.** Muestras en seco (a) y saturadas (b).



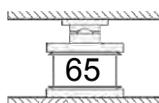
Fuente: Archivo fotográfico personal.

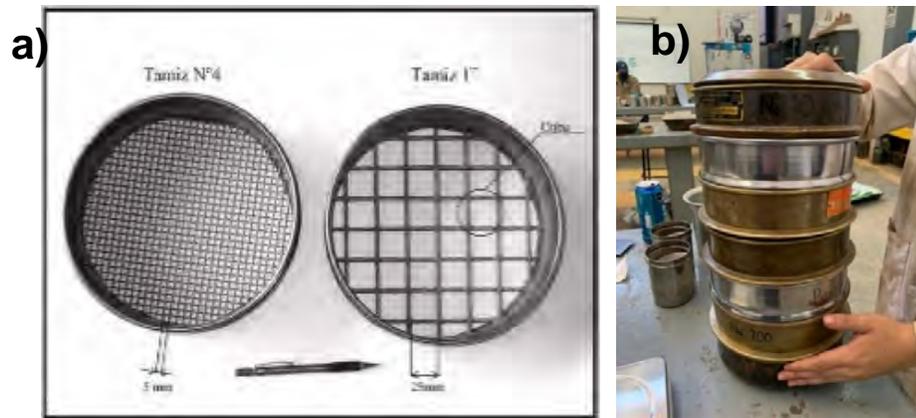
### 6.3.3 GRANULOMETRÍA

La granulometría se lleva a cabo mediante un proceso de análisis y medición de las partículas presentes en el material. Esto se logra mediante el uso de técnicas como tamizado, sedimentación, microscopía y análisis de imágenes. La información obtenida a través de la granulometría es útil en la caracterización de materiales y en la determinación de su comportamiento en diferentes aplicaciones.

El tamizado consiste en hacer pasar el material por diferentes mallas con diferentes tamaños de rejillas, por ejemplo: el tamiz No.4 corresponde a una malla con un 4 rendijas por pulgada cuadrada. Antes del cribado es necesario hacer un lavado a las muestras para disgregarlas aun más. De la misma manera se pueden calcular los pesos secos y húmedos para obtener el peso absoluto de cada muestra (Ver Anexo I).

**Figura 46.** Clasificación de tamices (a) y tamizado en laboratorio (b).





Fuente: Archivo fotográfico personal.

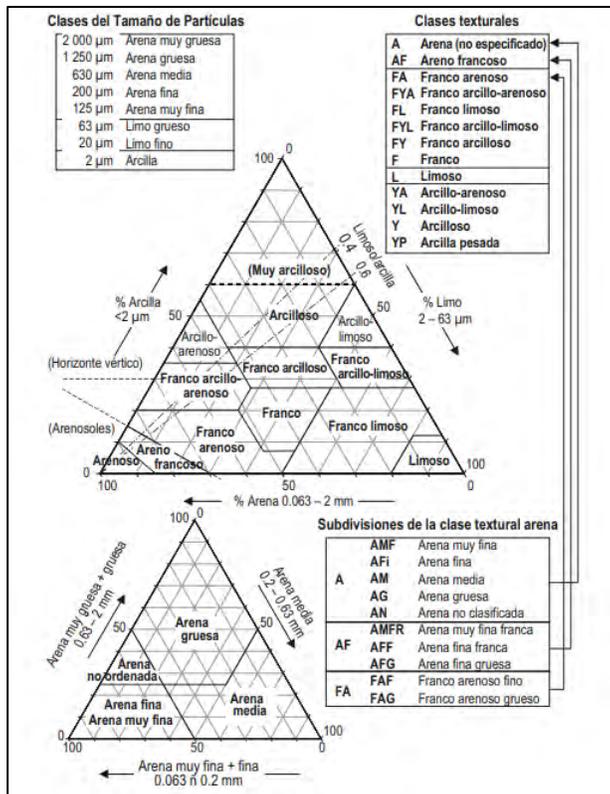
**Figura 47.** Tamizado por tamaño (a) y tamizado de ceniza (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

La combinación de las proporciones de estos tres tamaños de partículas determina la clasificación del suelo en diferentes clases. En las siguientes imágenes se pueden observar dichos diagramas.

**Figura 48.** Triángulos de granulometría.



Fuente: (Fao-Swalim, P; Nairobi, K.-U; Mayor, & Simón, S, 2009).

El triángulo de granulometría es un diagrama para clasificar y representar gráficamente las proporciones de diferentes tamaños de partículas presentes en un suelo. Se clasifican según estas tres categorías:

**Arenas:** la línea inferior representa el porcentaje de partículas de arena en el suelo, que tienen un tamaño que va desde los 0.05 mm hasta los 2 mm.

**Limos:** la línea izquierda representa el porcentaje de partículas de limo en el suelo, que tienen un tamaño que va desde los 0.002 mm hasta los 0,05 mm.

**Arcillas:** la línea derecha representa el porcentaje de partículas de arcilla en el suelo, que tienen un tamaño menor a 0.002 mm.

**Tabla 12.** Clasificación de los tipos de suelos.

Tipos de suelos				Símbolo de suelo <sup>(1)</sup>	Denominación común	
<b>SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS<sup>(2)</sup></b> Más de la mitad del material es de tamaño mayor que el mínimo que se puede observar a simple vista.	<b>GRAVA</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor de 5 mm (malla N° 4) <sup>(3)</sup>	Menos del 50% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Amplio rango en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	<b>GW</b>	Grava bien graduada, Mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.	
			Predominio de un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>GP</b>	Grava mal graduada, Mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.	
		Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Fracción fina no plástica (para identificación véase grupo ML, abajo)	<b>GM</b>	Grava limosa, mezclas de grava, arena y limo, mal graduada.	
			Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL, abajo)	<b>GC</b>	Grava arcillosa, mezclas de grava, arena y arcilla, mal graduada.	
	<b>ARENA</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es menor de 5 mm (malla N° 4) <sup>(3)</sup>	Menos del 5% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista.	Amplio rango de los tamaños de partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>SW</b>	Arena bien graduada, arena con grava y poco o nada de finos.	
			Predominio de un tamaño o un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.	<b>SP</b>	Arena mal graduada, arena con grava y poco o nada de finos.	
Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista		Fracción fina no plástica ( para identificación véase grupo ML, abajo)	<b>SM</b>	Arena limosa, mezclas de arena, grava y limo.		
		Fracción fina plástica ( para identificación véase grupo CL, abajo)	<b>SC</b>	Arena Arcillosa, mezclas de arena, grava y arcilla.		
<b>SUELOS DE PARTICULAS FINAS<sup>(4)</sup></b> Más de la mitad del material es son partículas menores que el tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Identificación de la fracción que pasa la malla N° 40 (0.425 mm)					
	<b>LIMO Y ARCILLA</b>	Dilatancia	Tenacidad	Resistencia en estado seco		
		Rápida	Nula	Nula	<b>ML</b>	Limo y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa.
		Lenta	Media	Nula	<b>MH</b>	Limo de alta compresibilidad, limo micáceo o diatomáceo
		Lenta a nula	Media	Media	<b>CL</b>	Arcilla de baja o mediana compresibilidad, arcilla con grava, arcilla arenosa
		Nula	Alta	Alta	<b>CH</b>	Arcilla de alta compresibilidad
		Rápida	Media	Media	<b>OL</b>	Limo orgánico de baja compresibilidad
		Rápida a Lenta	Media	Media	<b>OH</b>	Limo orgánico de alta compresibilidad
Suelo altamente orgánico	Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.			<b>Pt</b>	Turba	

Fuente: Manual de mecánica de suelos I (2008).

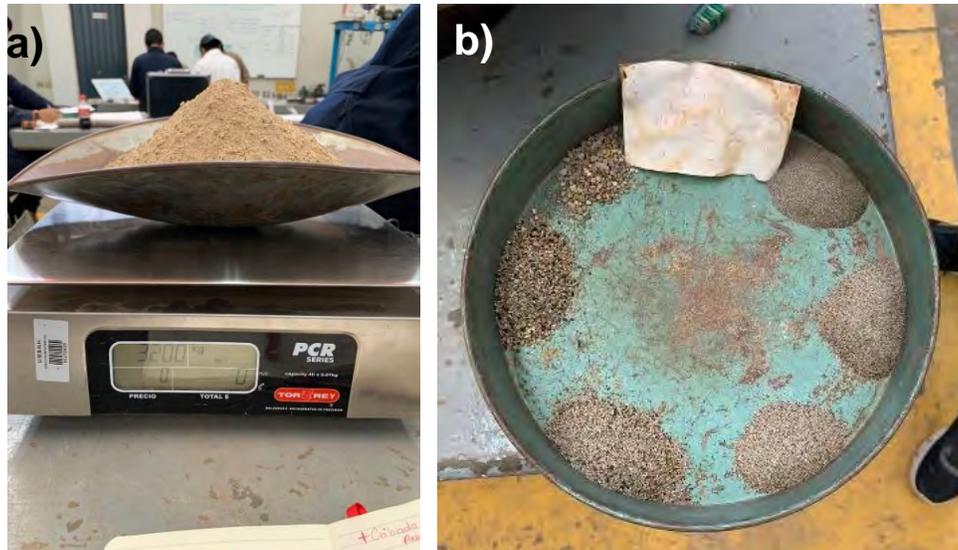
De acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, por sus siglas en inglés) y a la tabla 12, los suelos se dividen en 12 órdenes principales, que se clasifican conforme factores como la textura, la mineralogía, el contenido de materia orgánica y la profundidad. Estas categorías se subdividen aún más en subórdenes, grupos y subgrupos, lo que permite una clasificación detallada y precisa de los suelos.

Los símbolos de suelo en el SUCS se componen de dos partes: la primera parte describe la textura del suelo y la segunda parte describe las propiedades de consistencia y plasticidad. Por su textura se dividen en gruesos (Grava=G, Arena=S) y en finos (Limos=M, Arcilla=C, Suelo Orgánico=O, Turba=P). No obstante, por su plasticidad se dividen en: bien graduado=W, mal graduado=P, baja compresibilidad=L y alta compresibilidad=H. Por

ejemplo, si un suelo es "ML", "M" indica la textura limosa y "L" indica que el suelo es ligeramente plástico, pero también puede incluir la letra "C" para indicar que el suelo tiene un contenido significativo de arcilla (Manual de mecánica de suelos I, 2008).

Se realizó la granulometría para la arcilla, arena, ceniza y composiciones mixtas. El tamaño de los granos de las cenizas puede ser influenciado por diversos factores, como la temperatura de quema, la composición química de la materia prima, la velocidad de enfriamiento, entre otros. Por lo tanto, es importante controlar y monitorear la granulometría de las cenizas para asegurar su calidad y eficacia en diversas aplicaciones. El usar los tamices para este proceso se determinó que la ceniza forma parte de los suelos extra finos y requiere de una malla superior a la 200, la cual no se encuentra en este laboratorio.

**Figura 49.** Separación (a) y disgregado de granulometría (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.3.4 LÍMITES DE PLASTICIDAD

De acuerdo al Manual de mecánica de suelos (2008), Los límites de plasticidad son propiedades físicas de los suelos que indican su capacidad para cambiar de forma sin romperse cuando se someten a esfuerzos mecánicos.

Existen tres tipos de límites de plasticidad: el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el límite de contracción (LC). El límite líquido es el contenido de humedad en el suelo por encima del cual el suelo se comporta como un líquido y por debajo del cual se comporta como un sólido plástico. El límite plástico es el contenido de humedad en el suelo por debajo del cual el suelo se agrieta y se rompe al aplicarle una fuerza. El límite de contracción es el

contenido de humedad en el suelo por debajo del cual el suelo comienza a encogerse y a agrietarse debido a la pérdida de agua.

**Figura 50.** Límites de Atterberg.

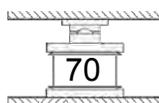


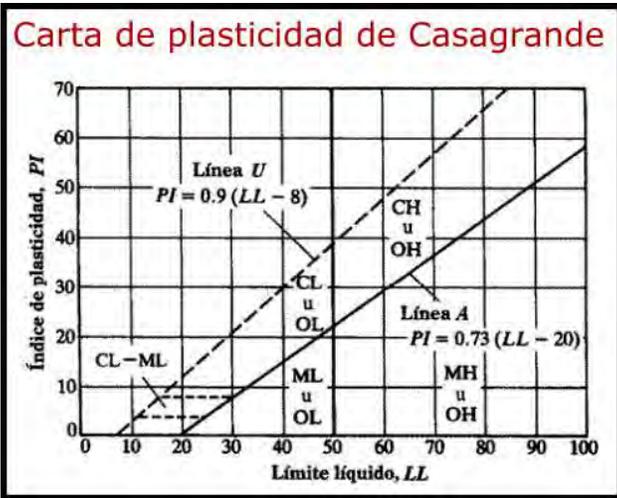
Fuente: (Moreno, 2020)

Los límites de plasticidad son importantes para la ingeniería geotécnica, ya que proporcionan información sobre la resistencia, la compresibilidad y la deformación de los suelos. Los valores de los límites de plasticidad se determinan mediante ensayos de laboratorio, como el ensayo de la copa de Casagrande para el límite líquido y el ensayo de rodadura para el límite plástico.

La carta de plasticidad de suelos es una herramienta que se utiliza para clasificar los diferentes tipos de suelos en función de su contenido de humedad y su plasticidad, proporcionando información valiosa para el diseño y la ingeniería de proyectos relacionados con suelos.

**Figura 51.** Carta de plasticidad de Casagrande.





Fuente: (Moreno, 2020)

Para obtener los índices de plasticidad primero obtenemos el índice líquido de un suelo por el método estándar, se emplea el procedimiento de Casagrande, según el cual se define como límite líquido el contenido de agua de fracción de suelo que pasa la malla N° 0.425 (40), cuando al ser colocada en la copa de Casagrande y efectuar en ella una ranura trapecial de dimensiones específicas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de 13.0 mm , después de golpear la copa 25 veces, dejándola caer sobre una superficie dura de características especiales, desde una altura de 1 centímetro y a una velocidad de 2 golpes por segundo.

**Figura 52.** Equipo de Casagrande (a) y prueba de plasticidad (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

De la prueba de la copa de Casagrande, el límite líquido se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$LL = W_N(N/25)^{0.12} \quad (3)$$

Dónde:

$LL$ =límite líquido del suelo, expresado como contenido de agua (%),  $W_N$ = Es el contenido de agua de la muestra respectiva, a la cual fue aplicado el número  $N$  de golpes en la prueba (%),  $N$ = Es el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 milímetros (Manual de mecánica de suelos I, 2008).

El límite plástico en el suelo se define como el mínimo contenido de agua de la fracción que pasa la malla Núm. 0.425 ( $N^\circ$  40), para que se puedan formar con ella cilindros de 3 mm, sin que se rompan o se desmoronen.

Para obtener el índice de plasticidad aplicamos la siguiente fórmula:

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

Dónde:  $IP$ = índice de plasticidad (%),  $LL$ =límite líquido, (%)  $LP$ = límite plástico (%)

En el método estándar el límite líquido se determina de manera gráfica mediante la curva de fluidez, la que se obtiene uniendo los puntos que representa los contenidos de agua correspondientes a diferentes números de golpes, para los cuales la ranura se cierra en la longitud especificada (Manual de mecánica de suelos I, 2008).

**Figura 53.** Mezcla (a) para prueba de plasticidad por rollo (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Debido a una contracción lineal prácticamente nula, las arenas muestra no pueden analizarse con la copa de Casagrande; a este tipo de suelo se le denomina inapreciable.

**Figura 54.** Prueba de expansión volumétrica (a) y contracción lineal (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Para calcular la expansión o contracción de las muestras después del secado es necesario emplear las siguientes fórmulas:

$$CL = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad (5)$$

Dónde: CL= contracción lineal,  $L_i$ = longitud inicial,  $L_f$ =longitud final

$$CV = W_{cv} - \left[ \frac{(V_i - V_f) \times \gamma_w}{W_s} \right] \times 100 \quad (6)$$

Dónde: CV=contracción volumétrica,  $W_{cv}$ = contenido de agua,  $W_s$ =peso del suelo seco,  $\gamma_w$  = densidad del agua

Algunos materiales como el barro, la arcilla y el yeso tienen una gran plasticidad, lo que les permite ser moldeados para crear ladrillos, baldosas, ornamentación, etc. En estos casos, la plasticidad es una propiedad deseable ya que permite que se produzcan formas y diseños diversos y creativos.

### 6.3.5 PESO VOLUMÉTRICO

El peso volumétrico, también conocido como peso unitario, es una medida de la densidad de un material en relación a su volumen. Se refiere al peso de un material por unidad de volumen, y se expresa en unidades de fuerza por unidad de volumen, como por ejemplo, gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ ).

En el caso de los suelos, el peso volumétrico se refiere al peso del suelo seco por unidad de volumen total del suelo, incluyendo los espacios de aire y agua en el suelo. Este valor puede variar dependiendo de las características del suelo, como su textura, densidad

aparente y contenido de humedad. Para obtener el peso volumétrico es necesario labrar unos terrones del tamaño de un molde cilíndrico, metálico o de porcelana, con el fondo plano y de aproximadamente 44 mm de diámetro y 12 mm de altura, se toman los pesos húmedos y secos de dichos terrones.

**Figura 55.** Prueba de peso volumétrico (a) e inmersión en mercurio (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Por último, se sumergen los terrones en mercurio y se obtiene el volumen del mercurio desalojado. Con esto podemos obtener el peso volumétrico de nuestras muestras de suelo al nivel de humedad del lugar del cual fueron extraídos. Usando la siguiente fórmula se realizarán dichos cálculos:

$$PVHL = \frac{W_{muestra}}{V_{Hg}} \quad (7)$$

Dónde:  $PVHL$ = Peso volumétrico húmedo del lugar ( $gr/cm^3$ ),  $W_{muestra}$ = Peso de la muestra en seco ( $gr$ ),  $V_{Hg}$ = Volumen desalojado por el mercurio ( $cm^3$ )

**Figura 56.** Terrones a prueba (a) y mercurio desalojado (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.3.6 PRUEBA PROCTOR

La prueba Proctor es una prueba estándar utilizada en ingeniería geotécnica para medir la densidad máxima y el contenido de humedad óptimo de un suelo compactado. Esta prueba se realiza para determinar la cantidad de agua que necesita un suelo para obtener la densidad máxima, es decir, la máxima compactación que se puede lograr al compactar un suelo.

Para realizar la prueba Proctor, se toma una muestra de suelo y se seca en el horno para obtener su peso seco. Luego, se mezcla con diferentes cantidades de agua para obtener diferentes contenidos de humedad y se compacta en un molde con una energía de compactación estandarizada. Se aplica el remoldeo (ver anexo II), el cual tiene como objetivo producir una muestra homogénea y compactada que represente las condiciones del suelo en el campo, y permita la realización de mediciones precisas de la densidad y la humedad.

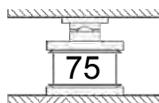
El proceso consiste en colocar una fracción del material en el molde de prueba específico según la muestra, junto con su correspondiente identificación. Para el apisonado es importante hacerlo uniformemente en forma de cruz y posteriormente en círculos, veinticinco veces.

**Figura 57.** Molde (a) y preparación de muestra para moldeo (b).

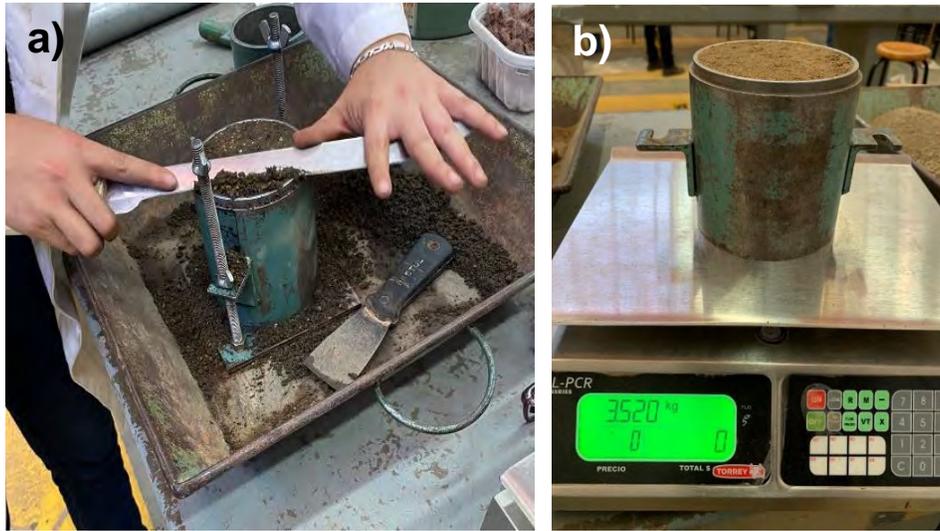


Fuente: Archivo fotográfico personal.

Luego, se coloca el molde sobre el bloque de concreto y se compacta el material con un pisón, utilizando la altura de caída y número de golpes correspondiente dependiendo de la variante de la prueba. Después, se raspa ligeramente la superficie de la capa compactada y se repite el procedimiento para las capas subsecuentes.



**Figura 58.** Moldeo (a) y pesaje de molde colmado (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Después de compactar, se mide la densidad y se calcula el porcentaje de contenido de humedad. Se repite el proceso con diferentes contenidos de humedad hasta que se alcanza la densidad máxima del suelo, es decir, el punto en el que la densidad del suelo ya no aumenta, incluso cuando se agrega más agua.

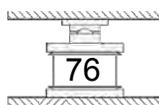
**Figura 59.** Compactación (a) y extracción de muestra en molde (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

De acuerdo al manual de mecánica de suelos I (2008), los cálculos básicos para esta prueba son los siguientes:

$$V = A_m h_e \quad (8)$$



Dónde:  $V$ =Volumen del espécimen ( $\text{cm}^3$ ),  $A_m$ =Área de la sección transversal del cilindro ( $\text{cm}^2$ ),  $h_e$ =altura del espécimen (cm),  $W_m$ =peso del espécimen húmedo (gr)

$$W_m = (\text{Peso del molde} + \text{Suelo húmedo}) - (\text{Peso del molde}) \quad (9)$$

Por lo tanto, el peso volumétrico húmedo en  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{g/cm}^3$ ,  $\gamma_m$  es:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V} \quad (10)$$

El peso del agua  $W_w$ :

$$W_w = (\text{Peso de la capsula} + \text{Suelo húmedo}) - (\text{Peso de la capsula} + \text{Suelo seco}) \quad (11)$$

El peso del suelo seco:

$$W_s = (\text{Peso de la capsula} + \text{Suelo seco}) - (\text{Peso de la capsula}) \quad (12)$$

El contenido de agua en % es:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (13)$$

Y por último, para obtener el peso específico máximo, empleamos la siguiente fórmula:

$$\gamma_{dmax} = \frac{\gamma_m}{(1 + \frac{\omega}{100})} \quad (14)$$

Con el peso específico máximo y el valor adimensional de densidad de sólidos (SS), se pueden lograr afirmaciones concluyentes con respecto a la compactación del material. Para mayor precisión puede emplearse una prensa hidráulica (ver figura 60).

**Figura 60.** Prensa hidráulica (a) y alineación para prueba de compactación (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

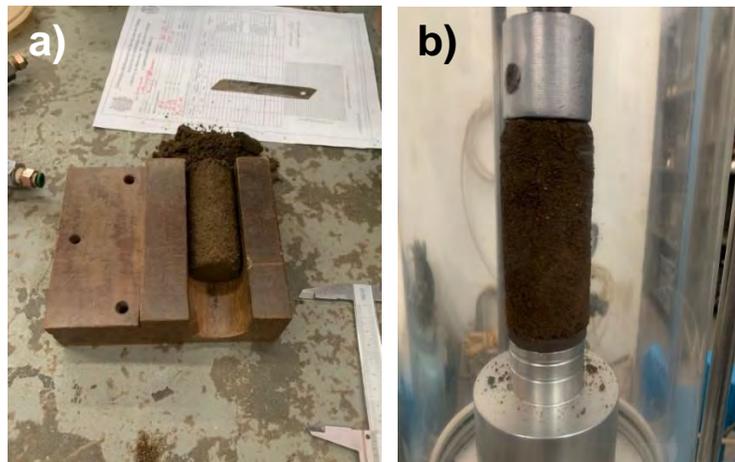


Con esta prueba, se puede determinar el contenido de humedad óptimo necesario para lograr la densidad máxima en un suelo y, por lo tanto, se puede utilizar para especificar las condiciones de compactación necesarias para proyectos de construcción de carreteras, presas, cimentaciones y otros proyectos de ingeniería geotécnica.

### 6.3.7 COMPRESIÓN SIMPLE

La prueba de compresión en mecánica de suelos es un ensayo utilizado para determinar la resistencia a la compresión de un suelo. Esta prueba se lleva a cabo aplicando una carga axial gradual y continua sobre una muestra de suelo confinada dentro de un cilindro de acero. En esta prueba, se aplica una fuerza axial de compresión gradual y controlada al material o elemento en cuestión hasta que se produce la falla o se alcanza una deformación predefinida. Primero es necesario usar el molde para apisonar la muestra compactarla, posteriormente se crea el cilindro de aproximadamente 3.3 cm de diámetro y una altura de 2 a 2.5 veces el diámetro.

**Figura 61.** Cilindros de arcilla con arena (a) y prueba a compresión (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

La muestra de suelo se coloca en la parte inferior de la prensa y se aplica una carga axial a través de una placa de carga en la parte superior del cilindro. La carga se aplica gradualmente hasta que la muestra se deforma o se rompe. Durante la prueba, se mide la deformación de la muestra y se registra la carga correspondiente. Se registran lecturas de carga y deformación cada 15 segundos durante la prueba hasta que la muestra falle, lo cual se considera cuando se registran dos cargas iguales o una carga menor que la anterior inmediata (Manual de mecánica de suelos II, 2006).

De todos los datos de esfuerzo registrados durante el tiempo en que se fractura la muestra, se diferencia el mayor y se emplea la siguiente fórmula:



$$COHESIÓN = \frac{q_u}{2} \quad (15)$$

Dónde:  $q_u$ =esfuerzo máximo (kg/cm<sup>2</sup>)

La cohesión es más significativa en suelos finos, como arcillas y limos, donde las partículas son más pequeñas y tienen una mayor capacidad para desarrollar fuerzas de atracción. En suelos granulares, como arenas y gravas, la cohesión es generalmente baja o nula debido a la falta de partículas finas y fuerzas de atracción significativas.

La utilidad de la prueba de compresión se basa en determinar la cohesión del suelo para conocer la capacidad para resistir cargas verticales. Los resultados de esta prueba son favorables para diseñar cimientos y estructuras en función de la resistencia del suelo.

**Figura 62.** Prueba a compresión (a) y registro de resultados en prensa (b).



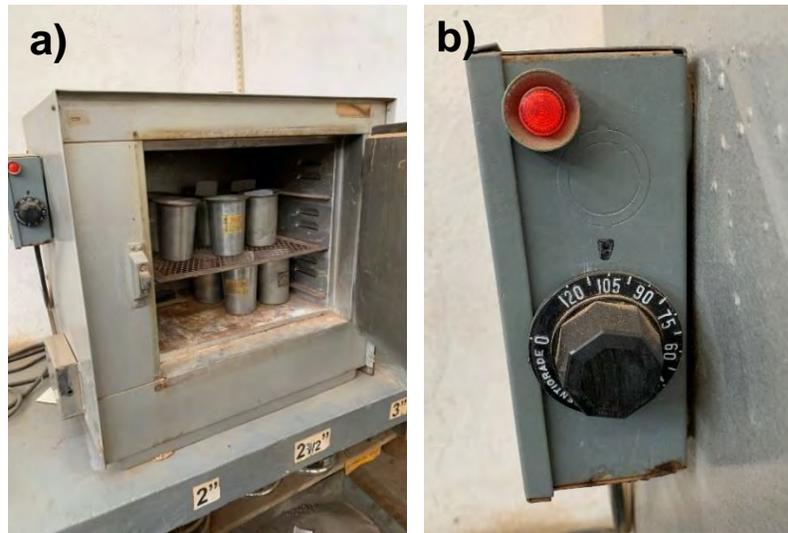
Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.3.8 DENSIDAD DE SÓLIDOS

La prueba de densidad de sólidos en suelos es una técnica utilizada para determinar la cantidad de masa de sólidos presentes en una muestra de suelo. La densidad de sólidos se refiere a la masa de los componentes sólidos de una muestra por unidad de volumen.

Para llevar a cabo esta prueba, se toma una muestra de suelo y se seca en un horno (a una temperatura constante de  $105 \pm 5$  °C) para eliminar toda la humedad. Se saca el aire del recipiente empleando una bomba de succión, se pesa la muestra seca y se coloca en un recipiente con un líquido de densidad conocida, como agua destilada. La masa del recipiente y la muestra de suelo se registra y se sumerge en el líquido (Manual de mecánica de suelos I, 2008).

**Figura 63.** Secado en horno de muestras (a) y termostato (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

El volumen del recipiente se mide y se utiliza para calcular la densidad del líquido y la masa de agua desplazada por la muestra de suelo. A partir de estos datos, se puede calcular la densidad de sólidos (SS) del suelo mediante la siguiente fórmula:

$$SS = \frac{W_{seca}}{V_{recip} - W_{recip} + W_{H_2O}} \quad (16)$$

Dónde:  $W_{seca}$ =masa seca de la muestra (gr),  $V_{recip}$ =volumen del recipiente ( $cm^3$ ),  $W_{recip}$ =masa del recipiente (gr),  $W_{H_2O}$ = Masa de agua desplazada (gr).

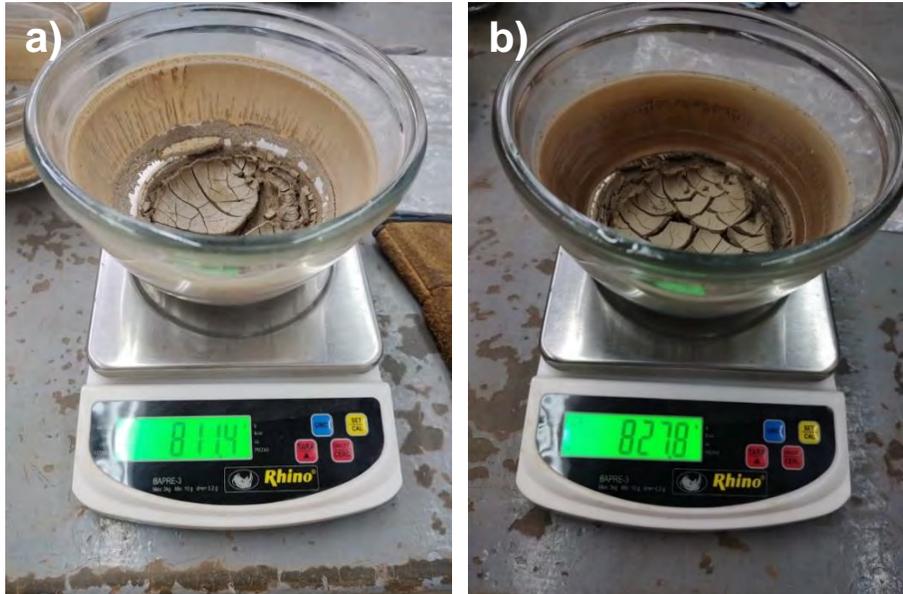
**Figura 64.** Bombeado al vacío (a) y llenado de agua destilada (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

La densidad de sólidos es una propiedad importante del suelo y se utiliza para calcular la porosidad, la densidad aparente y la capacidad de retención de agua de un suelo.

**Figura 65.** Sólidos secados de arcilla con arena (a) y mezcla con ceniza (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

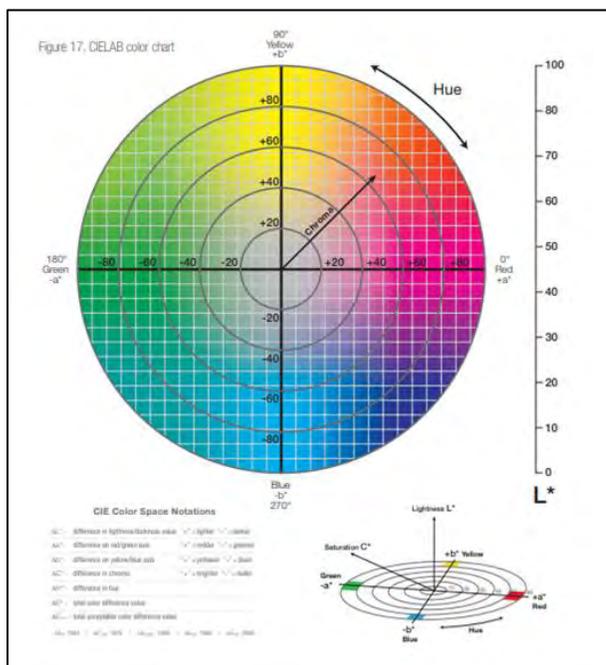
Cabe mencionar que para esta prueba es necesario limpiar y calibrar los matraces para tener una precisión mayor en los resultados finales, dicha calibración y sus resultados se encuentran en el anexo III.

### 6.3.9 COLORIMETRÍA

Para contrastar colores se emplea el modelo creado por la Comisión Internacional de la Iluminación Lab\* (CIELAB); el cual fue creado en 1976 y se basa en tres componentes: luminosidad ( $L^*$ ), que va de 0 (negro) a 100 (blanco);  $a^*$  que indica la posición del color en el eje verde-rojo; y  $b^*$  que indica la posición del color en el eje azul-amarillo. Estas tres dimensiones se combinan para representar cualquier color en un espacio de tres dimensiones.

El modelo CIELAB es un espacio de color perceptualmente uniforme, lo que significa que los cambios iguales en las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se perciben como cambios iguales en la apariencia del color. Esto lo hace útil para la especificación precisa de colores y para la medición de la diferencia de color entre dos objetos o imágenes. Este espacio de color se puede apreciar más claramente en la figura 66.

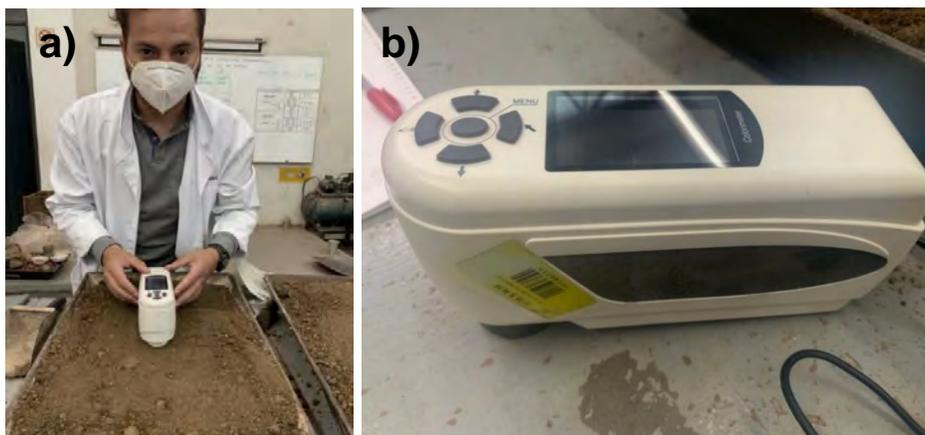
**Figura 66.** Diagrama CIELAB.



Fuente: (Imagen-digital, 2023).

La prueba de colorimetría consiste en la medición de la intensidad y el color de una muestra de suelo. Esta medición se realiza utilizando un instrumento llamado espectrofotómetro o colorímetro, que evalúa la cantidad de luz absorbida o transmitida a través de la muestra de suelo en diferentes longitudes de onda del espectro visible.

**Figura 67.** Prueba de colorimetría (a) y dispositivo CLRM-300 (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Esta medición se realiza utilizando un instrumento llamado espectrofotómetro o colorímetro, que evalúa la cantidad de luz absorbida o transmitida a través de la muestra

de suelo en diferentes longitudes de onda del espectro visible. El equipo empleado para esta prueba fue High Quality CLRM-300. Colocando el lente LED de silicón con una apertura de 8mm sobre la superficie a analizar. Se registran varias lecturas que se guardan en el dispositivo para finalmente promediar los valores de cada variable (L, a, b).

El color y la intensidad de las cenizas pueden ser indicativos de su composición química y de la calidad de la materia prima utilizada en su producción. Por ejemplo, cenizas más claras y de color gris pueden ser indicativas de una materia prima con una composición química más pura y uniforme, mientras que cenizas más oscuras y con tonalidades marrones o negruzcas pueden ser indicativas de una materia prima con una composición más heterogénea o con impurezas. Se empleó la misma técnica y dispositivo de colorimetría que con la arcilla y arena para registrar las variaciones.

En el caso de la arena, el color puede variar dependiendo de la composición mineralógica y la granulometría. En general, la arena puede presentar una variedad de tonalidades, desde tonos claros y beige hasta tonos más oscuros y rojizos, dependiendo de su origen y composición mineral. Se empleó la misma técnica y dispositivo de colorimetría que con la arcilla para registrar las variaciones.

**Figura 68.** Análisis colorimétrico de cenizas (a) y arena (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

La colorimetría es un factor fundamental en el patrimonio histórico y cultural de los pueblos de la región y del país, permitiendo identificar los pigmentos primigenios utilizados por los pueblos originarios y así poder seleccionar los más adecuados para su conservación y restauración cumpliendo la normatividad del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

### 6.3.10 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que aprovecha la emisión fluorescente o secundaria de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente de radiación X. Al incidir sobre la muestra, la radiación X primaria expulsa electrones de las capas internas del átomo. La utilidad principal de esta técnica espectroscópica es llevar a cabo un análisis químico elemental de muestras sólidas (como filtros, metales, rocas, muestras de polvo, tejidos, entre otros), tanto de manera cualitativa como cuantitativa. Esta técnica es capaz de detectar y analizar los elementos químicos que van desde el flúor hasta el uranio (Universidad de Burgos, 2020). Para esta prueba se utilizó el microscopio de barrido Jeol JSM-6510IV con la técnica de Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) y (FRX) que sirve para hacer análisis elemental.

**Figura 69.** Microscopio electrónico de barrido.



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

### 6.3.11 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X (DRX) ocurre cuando un haz de rayos X de una longitud de onda específica interactúa con una sustancia cristalina. A través de esta técnica es posible obtener información detallada sobre la estructura cristalina de una muestra, como la posición de los átomos y la distancia entre ellos. Tiene aplicación en una amplia variedad de campos, desde la química y la física hasta la biología y la ingeniería de materiales (Martinez-Ripoll, 2023).

Para esta prueba se empleó el difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance Linx Eye del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Figura 70.** Difractómetro de rayos X, Bruker D8.



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

### **6.3.12 MICROSCOPIA DE BARRIDO**

La microscopía de barrido es una técnica muy valiosa en la investigación científica y la ingeniería, ya que permite la observación detallada de la superficie de las muestras y la caracterización de su estructura y composición a nivel microscópico. Además, se utiliza ampliamente en la industria para el control de calidad y el desarrollo de nuevos materiales y productos.

Al igual que las pruebas realizadas a la fibra, se hicieron observaciones a las muestras de arcilla y cenizas. Estas observaciones se realizaron en un microscopio JSM-6510LV de JEOL equipado con un espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (EDS) Bruker QUANTAX 200 dentro del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) de la Universidad Autónoma del Estado de México.

### **6.4 ENSAYO DE ADOBES MUESTRA**

Los bloques de adobe tienen distintas medidas y composiciones según la región, el clima, la técnica, etcétera. Para esta investigación tomamos como muestra control los adobes realizados de manera tradicional en Santa María la Asunción, Zumpahuacán, Estado de México, los cuales aproximadamente tienen un peso de entre 15-17 kg y dimensiones de 40 cm x 20 cm x 14 cm respectivamente.

**Figura 71.** Pesaje y medición de bloques de adobe.



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Para las pruebas experimentales se utilizaron diferentes mezclas de adobe, las cuales fueron las siguientes:

TT: Adobe de Tierra (80% arena, 20% arcilla)

TP: Adobe Tradicional (80% arena, 20% arcilla, +15% del peso total en pasto seco)

TB: Adobe de Bagazo (80% arena, 20% arcilla, +15% del peso total en bagazo)

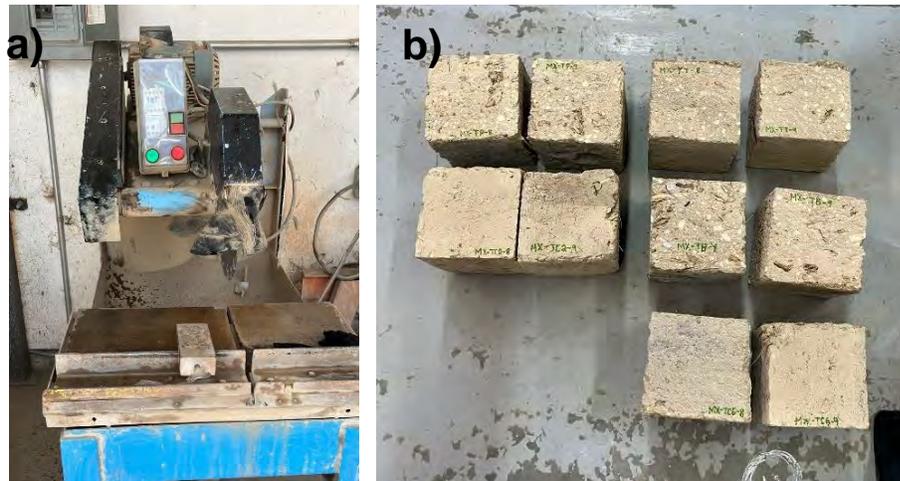
TC2: Adobe Adicionado I (80% arena, 20% arcilla, +15% del peso total en bagazo y 2% de agregado de ceniza)

TC6: Adobe Adicionado II (80% arena, 20% arcilla, +15% del peso total en bagazo y 6% de agregado de ceniza).

Las siglas anteriores van precedidas de MX para denotar que son muestras procedentes del Estado de México. Los adobes muestra fueron pesados y medidos para su análisis, posteriormente cortados en cubos de 12x12x12 cm ya que este es el espesor aproximado de los bloques.

De acuerdo a la norma NMX-C-037-ONNCCE-2004, para la prueba a compresión, deben ser puestos a prueba al menos cinco unidades, debido a esto se cortaron 25 cubos (5 de cada composición).

**Figura 72.** Máquina de corte (a) y muestras cubicas (b).



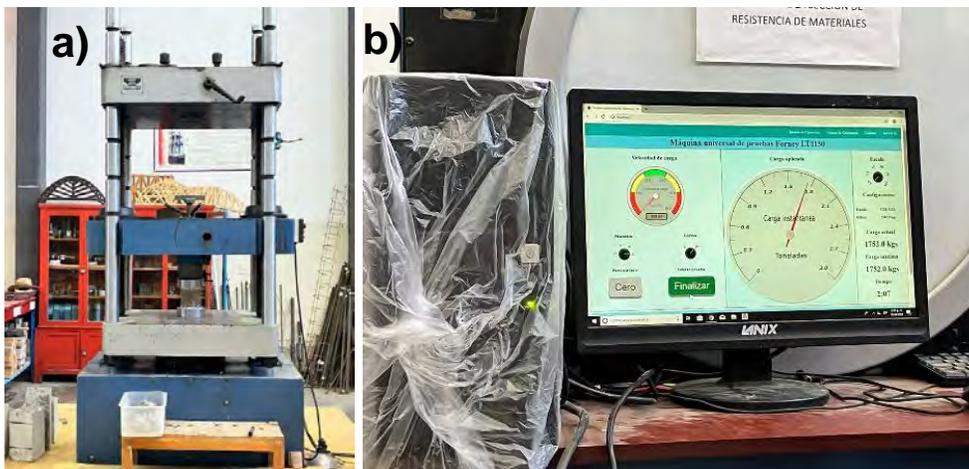
Fuente: Archivo fotográfico personal.

#### 6.4.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE

La prueba de esfuerzo a la compresión es un tipo de ensayo de materiales que se utiliza para medir la resistencia de un material a la deformación bajo una carga de compresión vertical. En esta prueba, se aplica una fuerza de compresión gradualmente creciente a una muestra del material, y se mide la cantidad de fuerza que se necesita para deformar o romper el material, comúnmente en Mega pascales (MP).

La prueba de esfuerzo a compresión simple fue realizada a cinco cubos de cada composición (25 en total) de 12x12x12 cm en el departamento de resistencia de materiales de la UMSNH con la máquina Forney LT1150 operada por los técnicos de laboratorio, siguiendo la norma mexicana NMX-C-083 (ONNCCE, 2014).

**Figura 73.** Máquina de ensayo universal (a) y monitor de resultados (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

Para este experimento es necesario emplear cubos o cilindros. Ya cortados es necesario cabecearlos, lo que significa agregar una capa de yeso o azufre para crear una superficie uniforme y el pistón aplique la fuerza uniformemente sobre las caras de los cubos y obtener un resultado homogéneo y fiable. En el caso de cubos de adobe o materiales porosos, cabecear es muy importante para esta prueba.

**Figura 74.** Mezcla de yeso (a) y cubos cabeceados (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

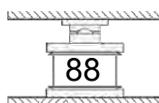
Una vez cabeceados los cubos se acomodan en la prensa, se alinean y posteriormente un técnico certificado controla la maquina universal con palancas y relevadores. La fuerza ejercida va aumentando hasta que se detiene, significando así que la muestra alcanzo su punto más alto de resistencia (visualmente se observan grietas o fisuras) y se puede retirar la muestra para probar la siguiente.

La ecuación para calcular el esfuerzo a compresión de las muestras es la siguiente:

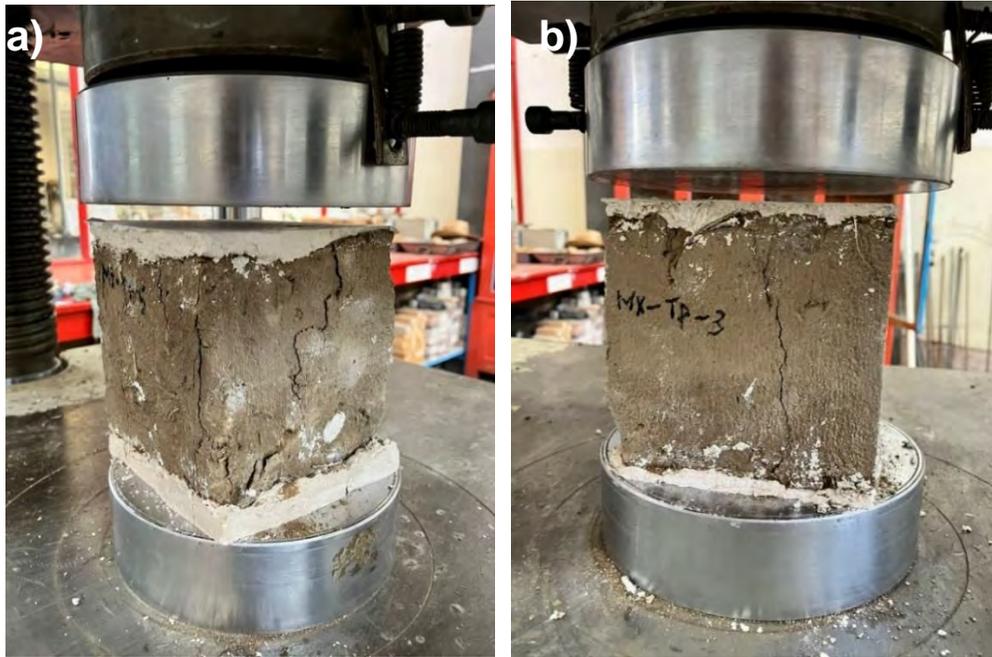
$$R_c = \frac{F}{A} \quad (17)$$

Dónde:  $R_c$ = resistencia a la compresión ( $\text{kgf/cm}^2$  ó  $\text{Mpa}$ )  $F$ = fuerza aplicada ( $\text{kgf}$  o  $\text{ton}$ ),  $A$ =superficie de contacto con la prensa ( $\text{cm}^2$ ). Los resultados de la prueba de esfuerzo a la compresión se utilizan para determinar la capacidad de carga de un material, lo que es importante para garantizar la seguridad y la fiabilidad de las estructuras y los productos fabricados para la construcción.

En las siguientes imágenes se pueden observar dos tipos de fractura distintos, diagonal y por esquinas, ya que fueron los puntos más débiles de los bloques y por donde se transmitió la fuerza de compresión aplicada.



**Figura 75.** Muestra fisurada por esfuerzo diagonal (a) y central (b).



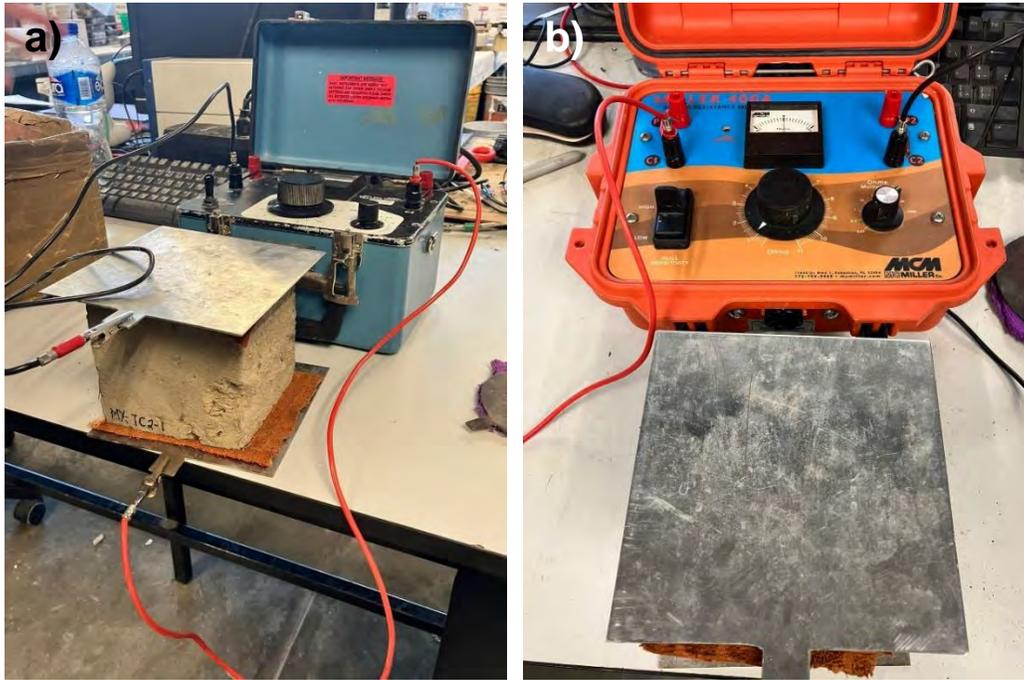
Fuente: Archivo fotográfico personal.

#### **6.4.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA**

La prueba de resistividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica. Esta magnitud se expresa en ohms por metro ( $\Omega/m$ ) y es una medida de la oposición que presenta un material a la corriente eléctrica en función de su longitud y sección transversal. Los materiales con alta resistividad eléctrica son buenos aislantes y pueden proteger de manera efectiva contra fugas de corriente eléctrica, mientras que los materiales con baja resistividad eléctrica son conductores y permiten que la corriente eléctrica fluya a través de ellos con facilidad.

Para esta prueba se requirieron dos dispositivos: resistómetro Nilson 400 y Miller 400A; se colocaron los cubos (12x12x12 cm) de distintas composiciones, a dos placas metálicas con distinta polaridad y por la cual se indujo una corriente eléctrica. El resistómetro se manipula para variar la corriente hasta que se cierre el circuito eléctricamente y se registran los resultados.

**Figura 76.** Resistómetro Nilson 400 (a) y Miller 400A (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

### 6.4.3 CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

Se pueden realizar dos pruebas para determinar la capacidad de absorción de un material: la prueba completa (establecida por la NMX-C-404-ONNCCE-2012) y la prueba rápida. En la prueba completa se seca el material durante 24 horas en un horno a 105-110°C, más adelante se pesa cada pieza y se sumerge en agua a 21°C durante 24 horas, para finalmente obtener el peso saturado de las muestras. Debido a la composición material del adobe y su rápido desmoronamiento; los adobes no resisten las pruebas completas y es necesario aplicar las pruebas rápidas.

En la prueba rápida se seca el material y se pesa, después se sumerge en agua con una altura no mayor a 2 centímetros y luego de 30 minutos, se pesa nuevamente para obtener el peso saturado.

Figura 77. Secado (a) y saturado de cubos de adobe (b).



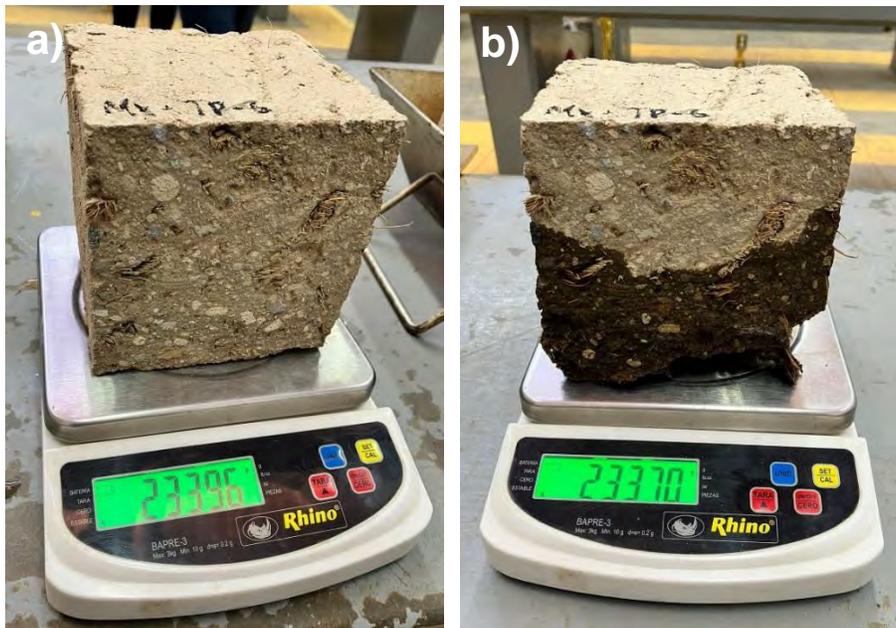
Fuente: Archivo fotográfico personal.

La fórmula para obtener el porcentaje de la capacidad de absorción del material es la siguiente:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{seco}} \times 100 \quad (18)$$

Dónde:  $W_{sat}$ =Peso saturado de la muestra (gr),  $W_{seco}$ =peso en seco (gr)

Figura 78. Análisis másico de muestras secas (a) y saturadas (b).



Fuente: Archivo fotográfico personal.

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados es el proceso de examinar y evaluar los datos recopilados para obtener conclusiones y obtener información relevante. En este caso, nos servirá para determinar si los datos obtenidos apoyan o refutan la hipótesis antes mencionada en este documento de tesis.

### 7.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

En este apartado se encuentran los valores numéricos de las características físicas y/o químicas del bagazo de agave (*angustifolia Haw*).

#### 7.1.1 PESO Y TAMAÑO

Los resultados promedio en longitud y gramaje de las fibras fueron los siguientes:

**Tabla 13.** Pesos y longitudes del bagazo.

Peso promedio (gr)*	Longitud promedio (cm)
0.75-1.40 +/- 0.25	1.10-3.85 +/-0.20

Fuente: Elaboración propia.

\*por cada mil metros de longitud de fibra

#### 7.1.2 MICROSCOPIA DE BARRIDO

A continuación una imagen lateral de la fibra:

**Figura 79.** Microscopía de fibra de bagazo de agave (0.25mm).



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023)

### 7.2 CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDOS

La única prueba de caracterización de líquidos fue la de pH. Se aplicó una tira reactiva a cada composición y para el agua utilizada en la mezcla del adobe.

### 7.2.1 POTENCIAL HIDRÓGENO

Minke (2005), afirma que en su mayoría los suelos arcillosos tienen un pH de 7 a 8.5 y que valores superiores a 7 pueden indicar la presencia de materia orgánica (flora y/o fauna) en la mezcla. Rivera-Salcedo et al (2021) mencionan que el pH óptimo para la mezcla de adobe para la construcción debe acercarse al valor de 5.67. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 14.** PH de las muestras.

Muestra	pH	Temperatura °C
Agua H <sub>2</sub> O	7	23.0
MX-TT	5	23.4
MX-TP	6	23.7
MX-TB	6	23.9
MX-TC2	6	23.5
MX-TC6	6	23.7

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

En los siguientes apartados se observan los resultados referentes a las arcillas, arenas y cenizas empleadas en dichos adobes.

#### 7.3.1 PROPIEDADES NATURALES

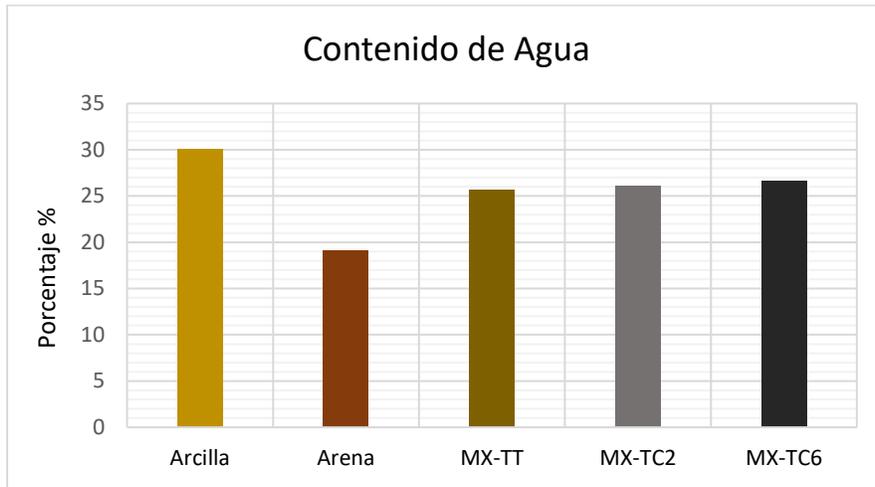
Los promedios de los contenidos de agua de cada muestra y su gráfico son los siguientes:

**Tabla 15.** Promedios de porcentajes de agua.

Muestra	% Agua	SD
Arcilla	30.035	1.4781
Arena	19.068	0.567
MX-TT	25.614	0.861
MX-TC2	26.083	1.577
MX-TC6	26.588	2.130

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 80.** Porcentajes de contenido de agua para cada muestra.



Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.2 GRANULOMETRÍA

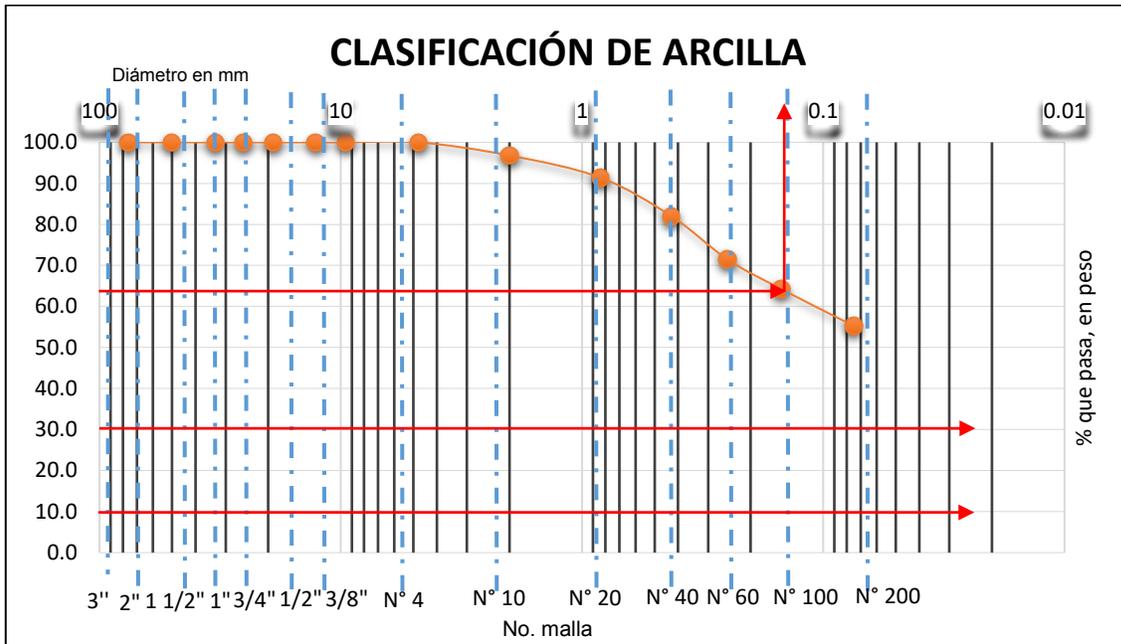
**Tabla 16.** Análisis granulométrico de arcilla.

Malla N°	Abertura (mm)	Porciento que pasa %	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD EN %
3"	76.2	100.0	>De 3"	0.0
2"	50.3	100.0	G	0.0
1 1/2"	33.1	100.0	S	44.7
1"	25.4	100.0	F	55.3
3/4"	19.02	100.0	Pasa la malla N° 4	100.0
1/2"	12.7	100.0		
3/8"	9.525	100.0		
N° 4	4.76	100.0		
N° 10	2	96.8		
N° 20	0.84	91.4		
N° 40	0.426	82.0		
N° 60	0.25	71.5		
N° 100	0.15	64.3		
N° 200	0.075	55.3		

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación SUCS= **CL**: Arcilla de baja plasticidad

**Figura 81.** Clasificación de arcilla según granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 17.** Análisis granulométrico de arena.

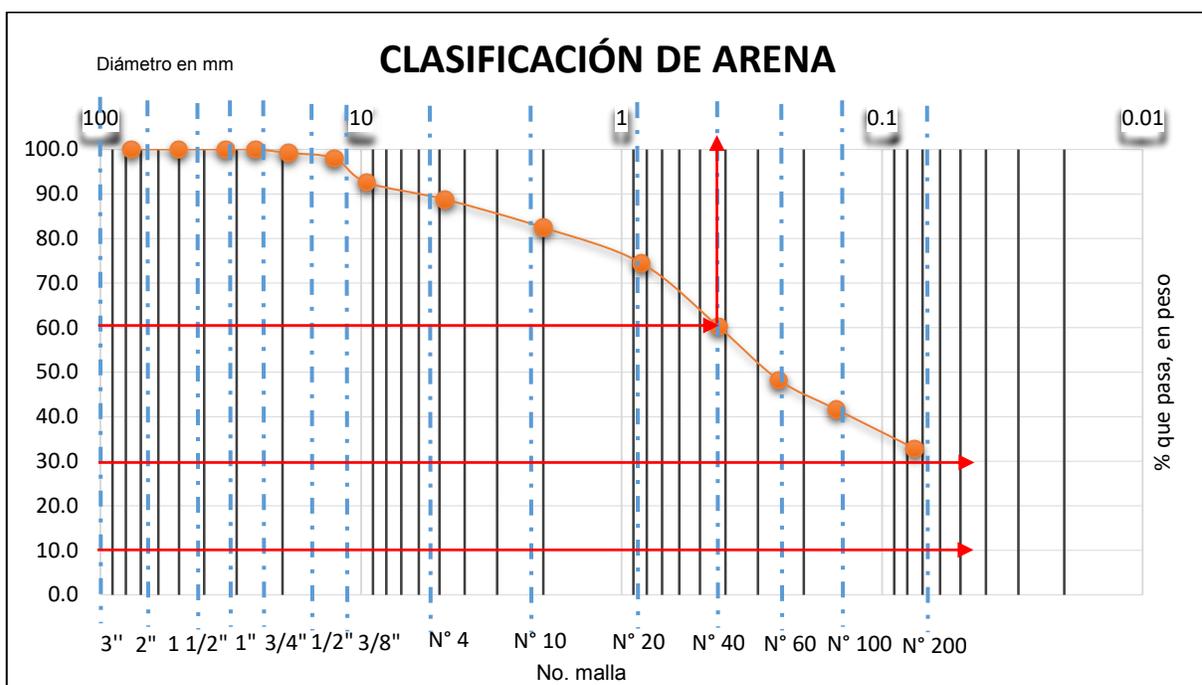
Malla N°	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa %
3"	76.2	100.0
2"	50.3	100.0
1 1/2"	33.1	100.0
1"	25.4	100.0
3/4"	19.02	99.2
1/2"	12.7	98.0
3/8"	9.525	92.6
N° 4	4.76	88.7
N° 10	2	82.4
N° 20	0.84	74.5
N° 40	0.426	60.3
N° 60	0.25	48.3
N° 100	0.15	41.6
N° 200	0.075	32.8

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD EN %
>De 3"	0.0
G	11.3
S	55.9
F	32.8
Pasa la malla N° 4	88.7

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación SUCS= **SM**: Arena limosa

**Figura 82.** Clasificación de arena según granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

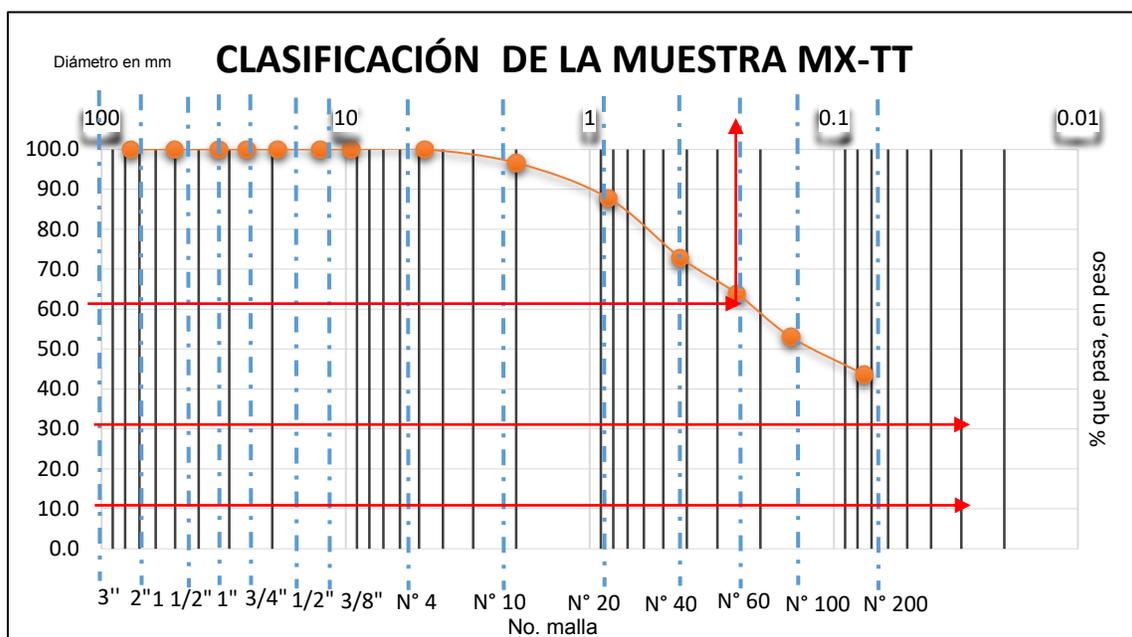
**Tabla 18.** Análisis granulométrico de la muestra MX-TT.

Malla N°	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa %	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD EN %
3"	76.2	100.0	>De 3"	0.0
2"	50.3	100.0	G	0.0
1 1/2"	33.1	100.0	S	56.4
1"	25.4	100.0	F	43.6
3/4"	19.02	100.0	Pasa la malla N° 4	100.0
1/2"	12.7	100.0		
3/8"	9.525	100.0		
N° 4	4.76	100.0		
N° 10	2	96.6		
N° 20	0.84	87.8		
N° 40	0.426	72.9		
N° 60	0.25	63.9		
N° 100	0.15	53.0		
N° 200	0.075	43.6		

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación SUCS= **SCL-ML**: Arenas arcillosas y/o limosas

**Figura 83.** Clasificación de muestra MX-TT según granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19.** Análisis granulométrico de la muestra MX-TC2.

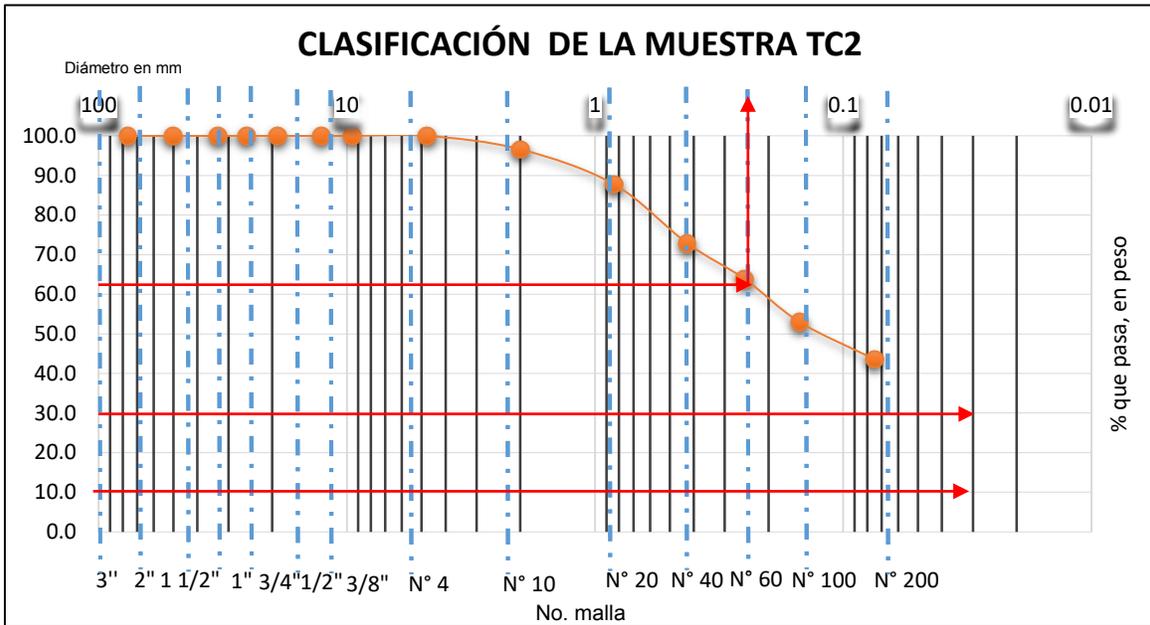
Malla N°	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa %	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD EN %
3"	76.2	100.0	>De 3"	0.0
2"	50.3	100.0	G	0.0
1 1/2"	33.1	100.0	S	55.5
1"	25.4	100.0	F	44.5
3/4"	19.02	100.0	Pasa la malla N° 4	100.0
1/2"	12.7	100.0		
3/8"	9.525	100.0		
N° 4	4.76	100.0		
N° 10	2	95.6		
N° 20	0.84	85.7		
N° 40	0.426	71.7		
N° 60	0.25	63.4		
N° 100	0.15	53.3		
N° 200	0.075	44.5		

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación SUCS= **SCL-ML\***: Arenas arcillosas y/o limosas

\*Esta composición requiere análisis de límites de plasticidad para una clasificación más precisa.

**Figura 84.** Clasificación de muestra MX-TC2 según granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20.** Análisis granulométrico de la muestra MX-TC6.

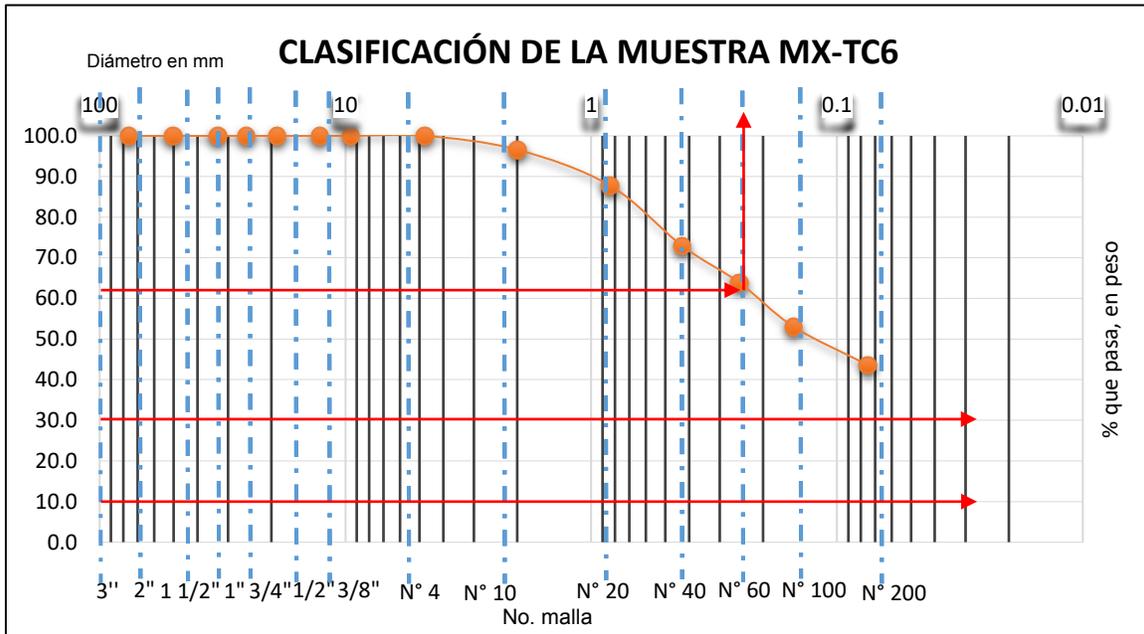
Malla N°	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa %	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD EN %
3"	76.2	100.0	>De 3"	0.0
2"	50.3	100.0	G	0.0
1 1/2"	33.1	100.0	S	54.0
1"	25.4	100.0	F	46.0
3/4"	19.02	100.0	Pasa la malla N° 4	100.0
1/2"	12.7	100.0		
3/8"	9.525	100.0		
N° 4	4.76	100.0		
N° 10	2	96.6		
N° 20	0.84	87.1		
N° 40	0.426	73.1		
N° 60	0.25	65.0		
N° 100	0.15	54.8		
N° 200	0.075	46.0		

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación SUCS= **SCL-ML\***: Arenas arcillosas y/o limosas

\*Requiere análisis de límites de plasticidad para una clasificación más precisa.

**Figura 85.** Clasificación de muestra MX-TC6 según granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados antes mencionados, las muestras y sus clasificaciones fueron las siguientes:

**Tabla 21.** Clasificación de las muestras por granulometría.

Muestra	Clasificación
Arcilla	CL (arcilla de baja plasticidad)
Arena	SM (arena limosa)
MX-TT	SCL-ML (Arena arcillosa y/o limosa)
MX-TC2	SCL-ML (Arena arcillosa y/o limosa)
MX-TC6	SCL-ML (Arena arcillosa y/o limosa)

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.3 LÍMITES DE PLASTICIDAD

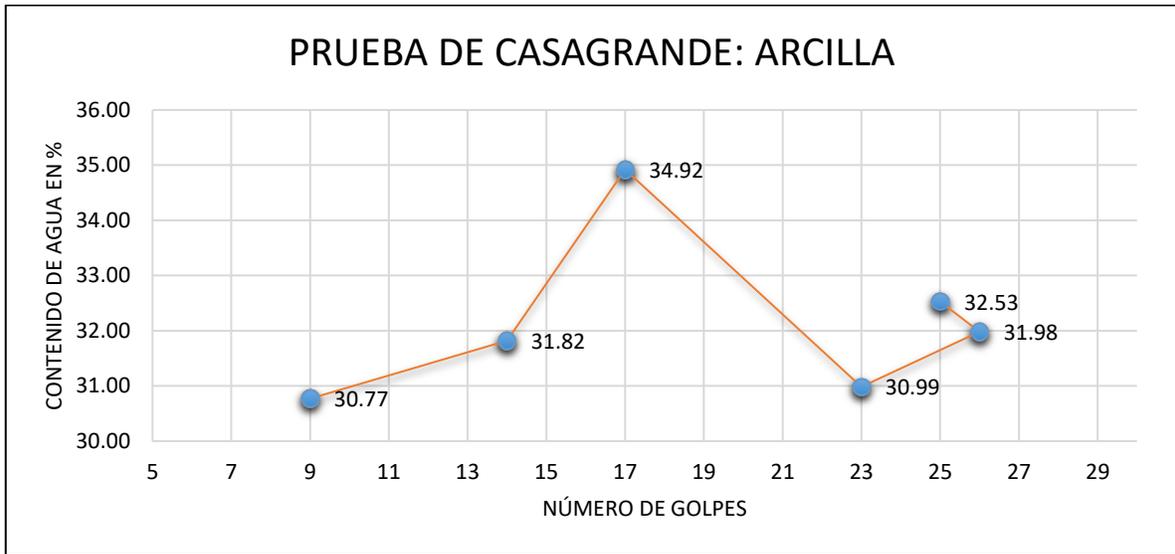
En las siguientes tablas y graficas se pueden observar los resultados de la prueba de Casagrande, de contracción lineal y volumétrica:

**Tabla 22.** Compilación de factores de plasticidad de la arcilla.

W (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)
33.333	30.68	21.88	8.80	6.181	18.950

Fuente: Elaboración propia.

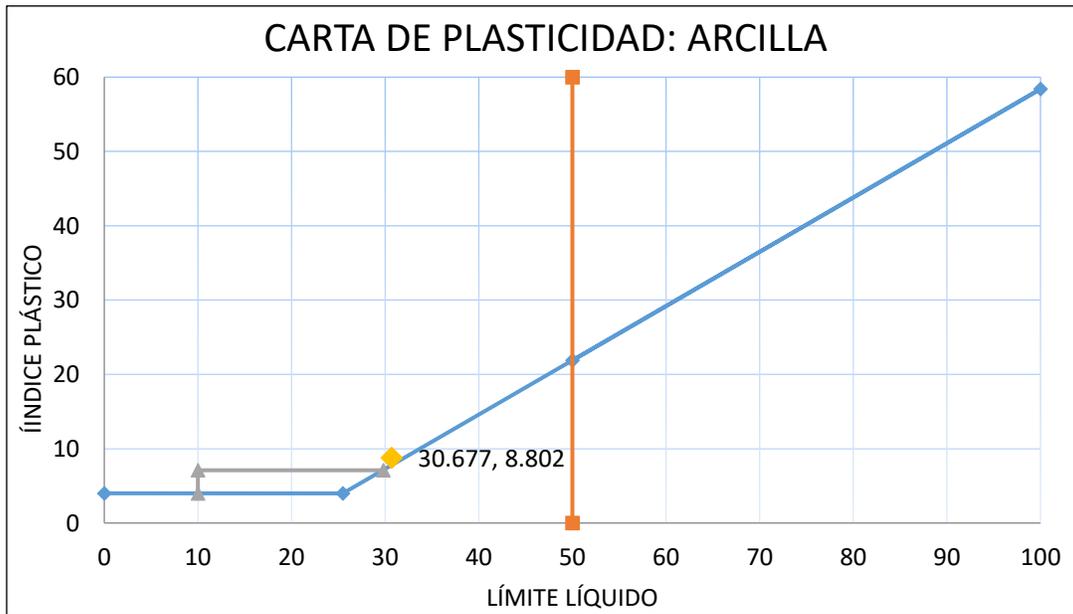
**Figura 86.** Prueba de Casagrande a arcilla\*.



Fuente: Elaboración propia.

\*Cabe mencionar que la prueba con la copa de Casagrande se realizó únicamente una vez para la arcilla.

**Figura 87.** Carta de plasticidad de arcilla.

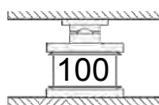


Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23.** Compilación de factores de plasticidad de la arcilla.

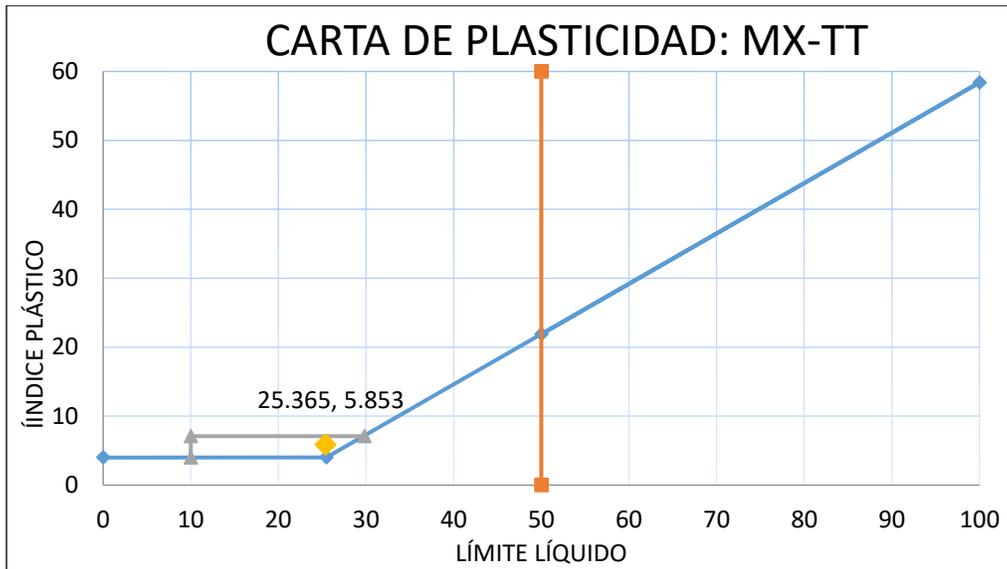
W (%)	LL (%)*	LP (%)*	IP (%)	CL (%)	CV (%)
3.571	0.00	-100.00	100.00	0.100	-60.786

Fuente: Elaboración propia.



\*Las arenas tienen tan baja plasticidad que no cumplen con esta prueba

**Figura 88.** Carta de plasticidad de la muestra MX-TT.



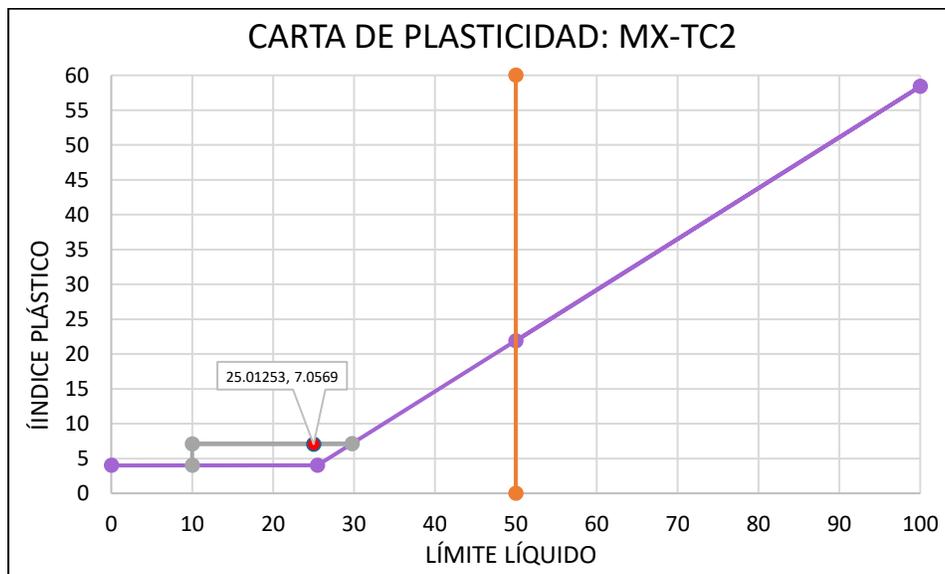
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24.** Compilación de factores de plasticidad de la muestra MX-TC2.

W (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)
19.102	25.012	17.955	7.056	2.457	11.684

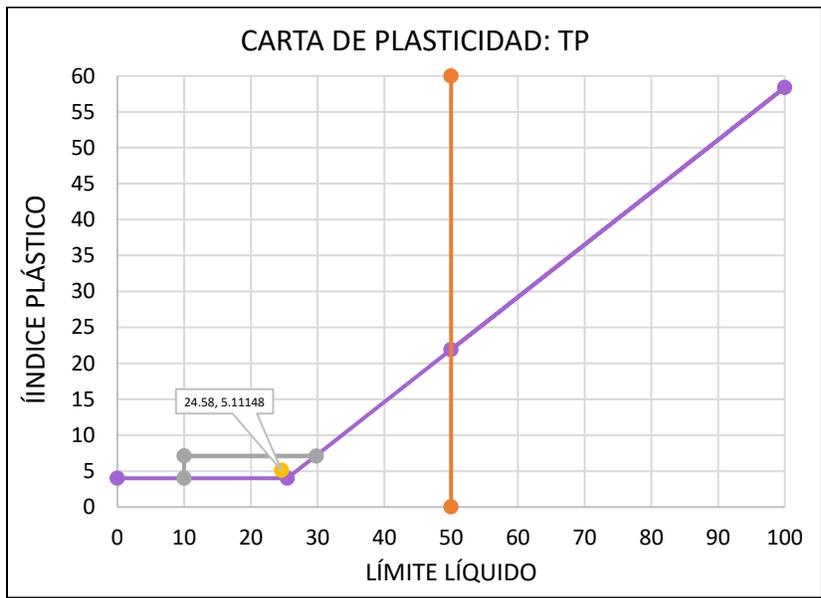
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 89.** Carta de plasticidad de la muestra MX-TC2.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 90.** Carta de plasticidad de la muestra MX-TP.



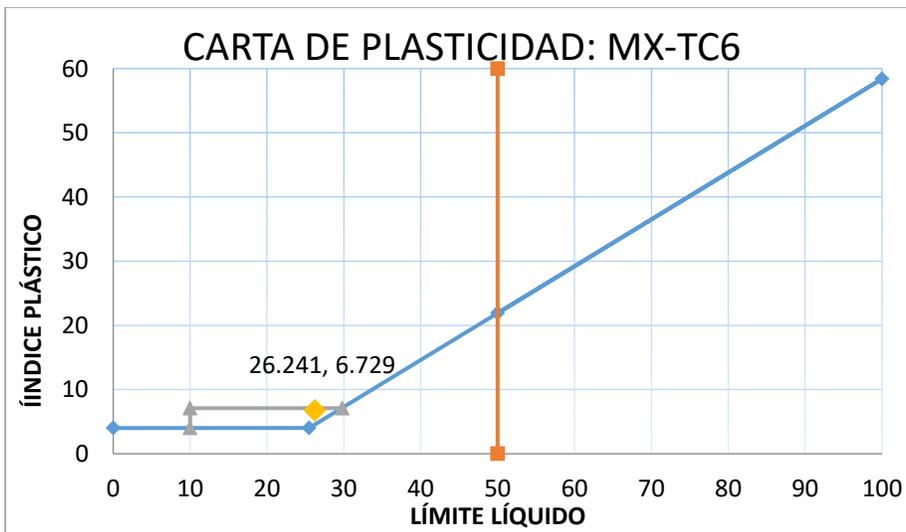
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25.** Compilación de factores de plasticidad de la arcilla.

W (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)
22.973	26.24	19.51	6.73	2.915	12.963

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 91.** Carta de plasticidad de la muestra MX-TC6.



Fuente: Elaboración propia.

Resumiendo todos los índices de plasticidad en una sola gráfica:

**Figura 92.** Carta de plasticidad de todas las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.4 PESO VOLUMÉTRICO

Siendo la masa de un objeto dividida por su volumen, y se expresa en unidades de masa por unidad de volumen, se empleó el mercurio para realizar esta prueba, a continuación los resultados:

**Tabla 26.** Peso volumétrico de las muestras de arcilla.

Muestra	W (gr)	W Hg (gr)	$\rho$ Hg (gr/cm <sup>3</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )
1	17.8	128	13.56	9.44	1.89
2	17.5	126	13.56	9.29	1.88
3	17.6	125	13.56	9.22	1.91
4	20.4	137	13.56	10.10	2.02
5	17	129.2	13.56	9.53	1.78
6	11	91	13.56	6.71	1.64
7	18	140.6	13.56	10.37	1.74
8	26.4	187	13.56	13.79	1.91
9	18	130.8	13.56	9.65	1.87
10	17.8	133.2	13.56	9.82	1.81
Promedio	18.15	132.8	13.56	9.792	1.84

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 27.** Peso volumétrico de las muestras de arena.

Muestra	W (gr)	W Hg (gr)	$\rho$ Hg (gr/cm <sup>3</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )
1	17.8	147.4	13.56	10.87	1.64
2	16.2	139	13.56	10.25	1.58
3	18	153	13.56	11.28	1.60
4	15.6	131.8	13.56	9.72	1.60
5	18	147.2	13.56	10.86	1.66
6	15.2	124.4	13.56	9.17	1.66
7	16	135.8	13.56	10.01	1.60
Promedio	16.69	139.8	13.56	10.31	1.62

Fuente: Elaboración propia.

**7.3.5 PRUEBA PROCTOR**

Al obtener los pesos y contenidos de agua de las muestras (Ver tablas 38-44), se procede a graficar los últimos dos renglones del registro de la siguiente manera:

En el eje de las abscisas denotar los contenidos de agua ( $\omega$ ) en porcentaje y en el eje de las ordenadas los pesos volumétricos secos ( $\gamma_d$ ).

En el punto más alto de la parábola, con la horizontal se consigue el peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) y con la vertical se obtiene la humedad óptima ( $\omega_{opt}$ ).

**Tabla 28.** Prueba Proctor a arcilla.

TIPO DE PRUEBA: Proctor Estándar Var A						
VOL:		930.7	cm <sup>3</sup>	Peso:	1965	gr
OBRA:	80-20		MOLDE:	4		
SONDEO:	1	ENSAYE N°:	1	Peso. MARTILLO:	2500 ± 100	gr
MUESTRA N°:	1	PROF:	0	No. de capas		3
ALTURA DE CAIDA:	30.05 ± 0.1 cm					
N° DE G. POR CAPA:	25					

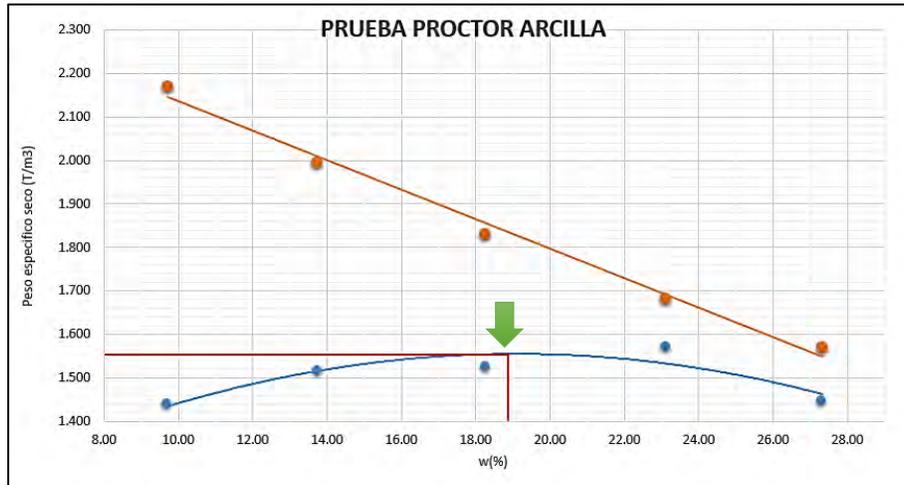
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 29.** Contenido de agua, peso específico seco y densidad de sólidos de arcilla.

W (%)=	19	P.e.s=	1.56	Ss=	2.75
--------	----	--------	------	-----	------

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 93.** Peso específico vs contenido de agua en arcilla.



Fuente: Elaboración propia.

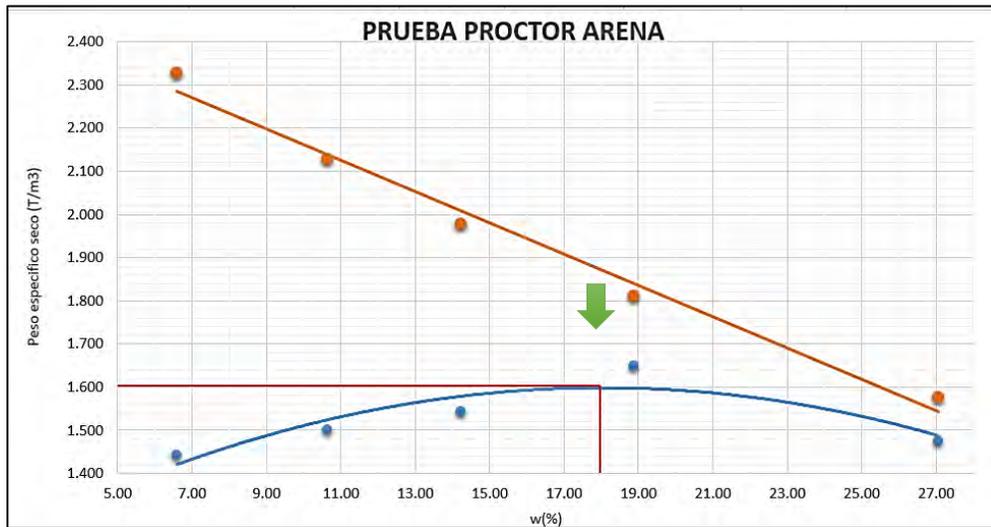
Es recomendable que esta prueba se logre en un mínimo de 4 ensayos y un máximo de 6, con el fin que se logre definir la parábola de forma completa.

**Tabla 30.** Prueba Proctor a arena.

TIPO DE PRUEBA: Proctor Estándar Var A						
VOL:		930.7	cm3	Peso:	1965	gr
OBRA:	80-20		MOLDE:	4		
SONDEO:	1	ENSAYE N°:	1	Peso. MARTILLO:	2500 ± 100	gr
MUESTRA N°:	1	PROF:	0	No. de capas		3
ALTURA DE CAIDA:	30.05 ± 0.1 cm					
N° DE G. POR CAPA:	25					

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 94.** Peso específico vs contenido de agua en arena.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 31.** Contenido de agua, peso específico seco y densidad de sólidos de arena.

W (%)=	18	P.e.s=	1.6	Ss=	2.75
--------	----	--------	-----	-----	------

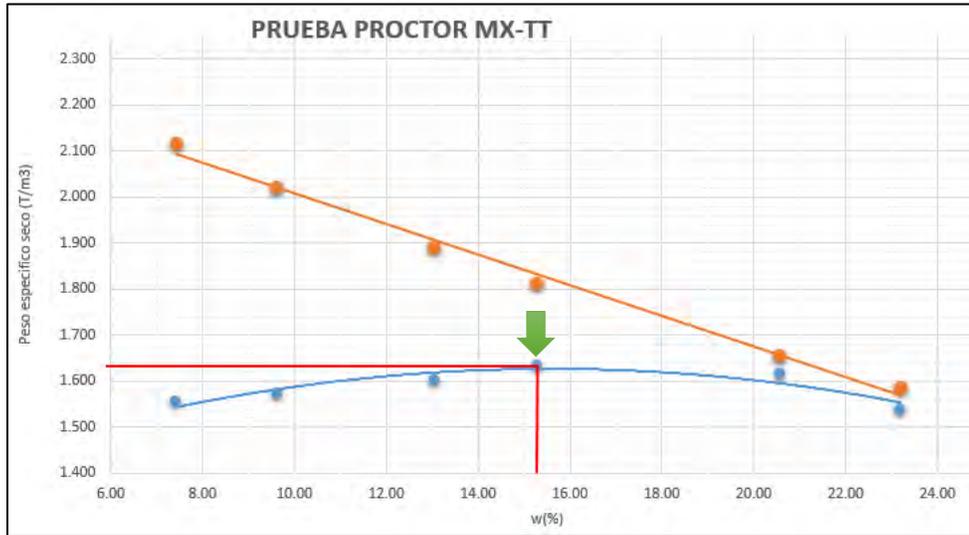
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 32.** Prueba Proctor a muestra MX-TT.

TIPO DE PRUEBA: Proctor Estándar Var A						
VOL:		930.7	cm3	Peso:	1965	gr
OBRA:	80-20		MOLDE:	4		
SONDEO:	1	ENSAYE N°:	1	Peso. MARTILLO:	2500 ± 100	gr
MUESTRA N°:	1	PROF:	0	No. de capas		3
ALTURA DE CAIDA:	30.05 ± 0.1 cm					
N° DE G. POR CAPA:	25					

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 95.** Peso específico vs contenido de agua en MX-TT.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 33.** Contenido de agua y peso específico seco de muestra MX-TT.

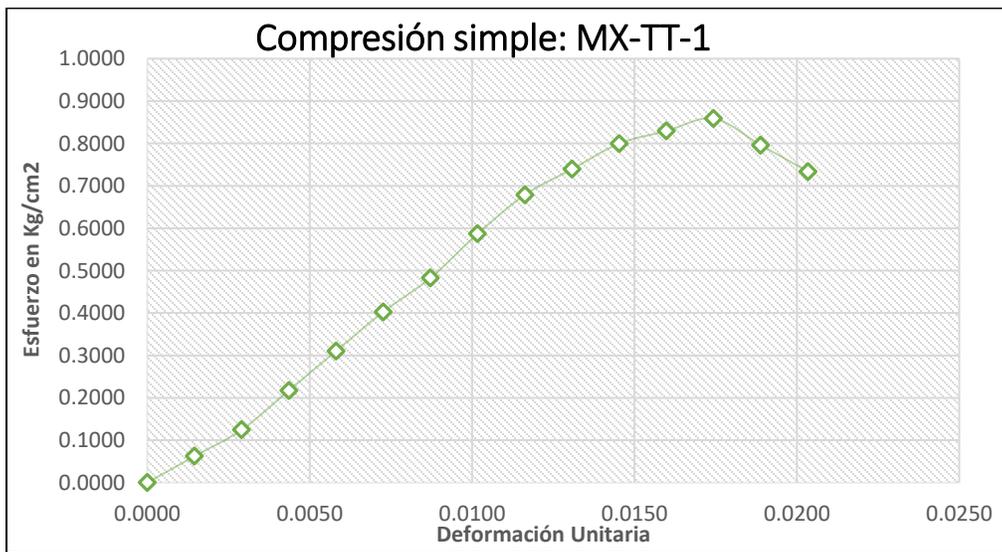
W (%)=	15.5	P.e.s=	1.63	Ss=	2.51
--------	------	--------	------	-----	------

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.6 COMPRESIÓN SIMPLE

Debido a la baja compresibilidad de los materiales, se realizó la prueba únicamente a la composición 80% arena, 20% arcilla, incluso la humedad del ambiente afecta notoriamente los resultados con el tiempo. A continuación dichos resultados:

**Figura 96.** Esfuerzo vs deformación, muestra MX-TT-1.



Fuente: Elaboración propia.



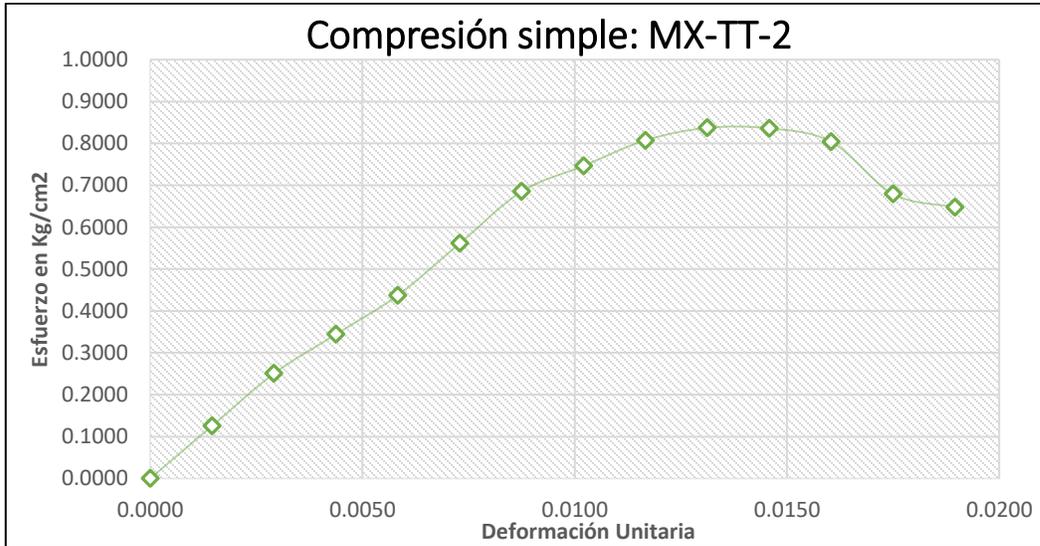
**Tabla 34.** Factores de compresión de la muestra MX-TT-1.

Ds=	3.5 cm	As=	9.621 cm <sup>2</sup>	wm=	154 gr	ESFUERZO MÁX.=	0.8587	Kg/cm <sup>2</sup>
Dc=	3.5 cm	Ac=	9.621 cm <sup>2</sup>	Vm=	84.02 cm <sup>2</sup>	CENTRO=	1.2880	Kg/cm <sup>2</sup>
Di=	3.49 cm	Ai=	9.566 cm <sup>2</sup>	Ym=	1.833 Ton/cm <sup>3</sup>	RADIO=	0.4293	Kg/cm <sup>2</sup>
Hm=	8.74 cm	Am=	As+4Ac+Ai			=	9.612	cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

Esfuerzo máximo s3=0.857 Kg/cm2

**Figura 97.** Esfuerzo vs deformación, muestra MX-TT-2.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 35.** Factores de compresión de la muestra MX-TT-2.

Ds=	3.49 cm	As=	9.566 cm <sup>2</sup>	wm=	157.8 gr	ESFUERZO MÁX.=	0.8372	Kg/cm <sup>2</sup>
Dc=	3.49 cm	Ac=	9.566 cm <sup>2</sup>	Vm=	83.15 cm <sup>2</sup>	CENTRO=	1.2558	Kg/cm <sup>2</sup>
Di=	3.47 cm	Ai=	9.457 cm <sup>2</sup>	Ym=	1.898 Ton/cm <sup>3</sup>	RADIO=	0.4186	Kg/cm <sup>2</sup>
Hm=	8.71 cm	Am=	As+4Ac+Ai			=	9.548	cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

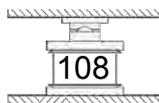
Esfuerzo máximo s3=0.837 Kg/cm2

**Tabla 36.** Factores de compresión de la muestra MX-TT-3.

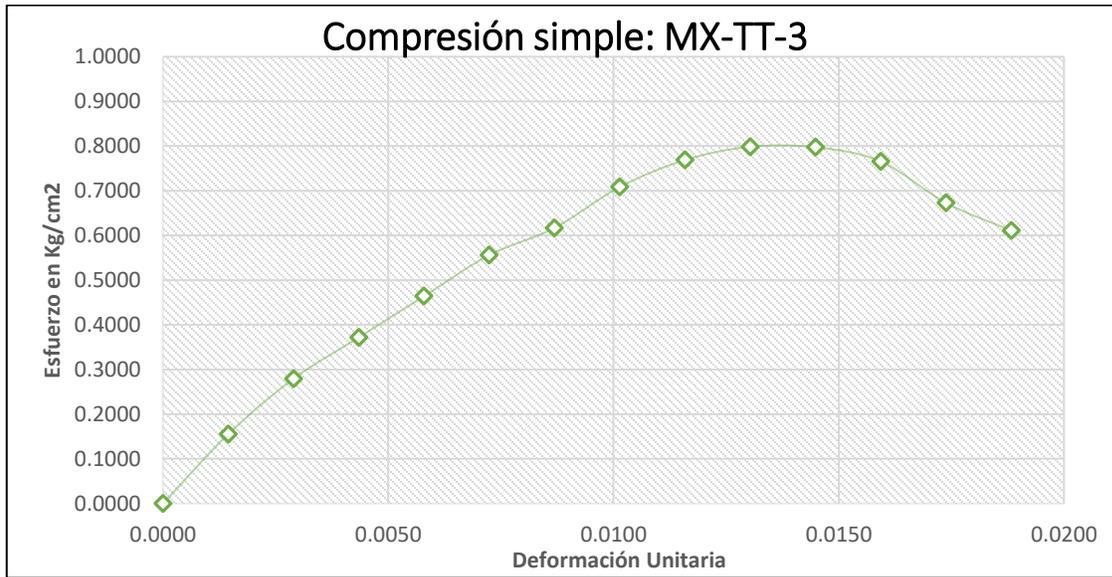
Ds=	3.44 cm	As=	9.294 cm <sup>2</sup>	wm=	153.6 gr	ESFUERZO MÁX.=	0.7985	Kg/cm <sup>2</sup>
Dc=	3.5 cm	Ac=	9.621 cm <sup>2</sup>	Vm=	84.52 cm <sup>2</sup>	CENTRO=	1.1978	Kg/cm <sup>2</sup>
Di=	3.58 cm	Ai=	10.066 cm <sup>2</sup>	Ym=	1.817 Ton/cm <sup>3</sup>	RADIO=	0.3993	Kg/cm <sup>2</sup>
Hm=	8.77 cm	Am=	As+4Ac+Ai			=	9.641	cm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

Esfuerzo máximo s3=0.798 Kg/cm2



**Figura 98.** Esfuerzo vs deformación, muestra MX-TT-3.



Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.7 DENSIDAD DE SÓLIDOS

En seguida se muestran los resultados de los pesos y el valor de la densidad de sólidos de cada muestra:

**Tabla 37.** Factores de densidad de sólidos de la muestra MX-TT.

DENSIDAD DE SÓLIDOS (Arena 80% Arcilla 20%)			
PRUEBA N°	1	2	3
Matraz N°	10	XV	14
W <sub>fsw</sub> (gr)	721.8	714.6	780.1
Temperatura (°C)	26	34.5	24.8
W <sub>fw</sub> (gr)	691.65	684.73	690.74
Capsula de evaporación N°	10	8	3A
Peso de la capsula + muestra seca (gr)	706.4	706.4	811.4
Peso de la capsula (gr)	657.4	657.2	657.3
W <sub>s</sub> (gr)	49	49.2	154.1
S <sub>s</sub> (adimensional)	2.60	2.54	2.38
Promedio=	2.51		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 38.** Factores de densidad de sólidos de la muestra MX-TC6.

DENSIDAD DE SÓLIDOS (Arena 80% Arcilla 20% Ceniza 6%)			
PRUEBA N°	1	2	3
Matraz N°	10	XV	14
Wfsw (gr)	721	716	730.8
Temperatura (°C)	30	27.5	25.5
Wfw (gr)	691.14	685.71	690.66
Capsula de evaporación N°	A	20	74
Peso de la capsula + muestra seca (gr)	812.6	705.6	827.4
Peso de la capsula (gr)	763.2	656.2	763.4
Ws (gr)	49.4	49.4	64
Ss (adimensional)	2.53	2.59	2.68
Promedio=	2.6		

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.8 COLORIMETRÍA

Para calcular los valores CIELAB, se realizan 6 registro ópticos de cada muestra y el resultado final es el promedio de los colores en el conjunto. Además con el uso de cualquier convertidor en línea (E-paint, 2023) , pueden obtenerse los colores digitalmente al ingresar los valores registrados por el colorímetro. Dichos valores se muestran en las subsecuentes tablas:

**Tabla 39.** Resultados de la prueba de colorimetría.

ARCILLA								
Valor	1	2	3	4	5	AVG	Color Lab	Fotografía
L*	30.58	26.90	29.18	29.78	31.78	29.64		
a*	6.70	7.83	7.01	6.54	6.22	6.86		
b*	11.91	11.06	12.08	12.12	12.93	12.02		
C*	14.45	13.55	13.97	13.78	14.34	14.02		
h*	62.16	54.71	59.87	61.66	64.34	60.55		
ARENA								
Valor	1	2	3	4	5	AVG	Color Lab	Fotografía
L*	29.26	28.27	31.33	28.59	31.57	29.80		
a*	6.83	6.89	6.06	6.74	6.45	6.59		
b*	11.72	11.19	12.27	11.42	12.88	11.90		
C*	13.57	13.14	13.68	13.26	14.41	13.61		
h*	60.29	58.37	63.34	59.43	63.40	60.97		

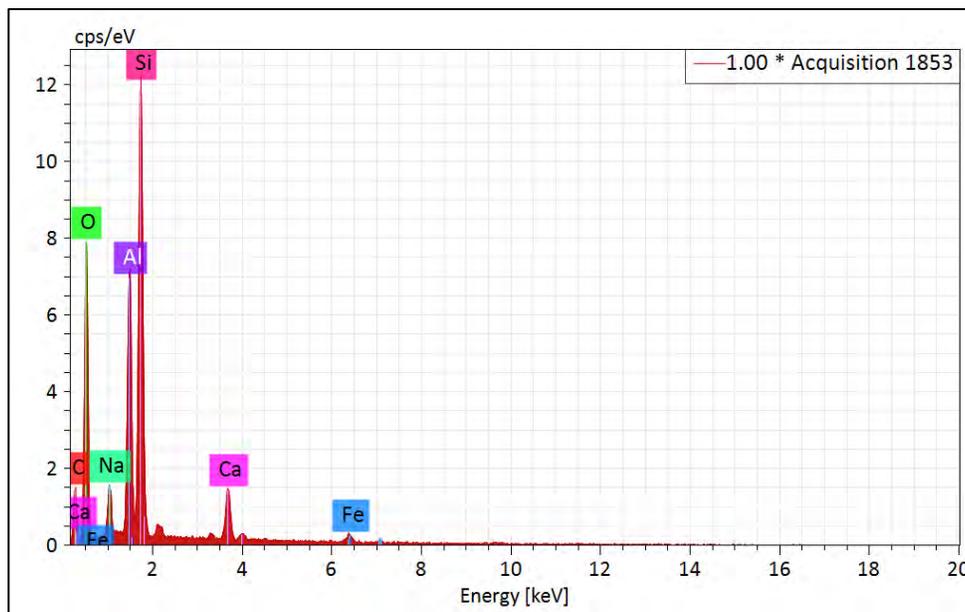
CENIZA							Color Lab	Fotografía
Valor	1	2	3	4	5	AVG		
L*	53.66	52.26	51.37	50.73	51.41	51.89		
a*	3.89	3.59	3.00	3.41	3.25	3.43		
b*	7.81	7.69	7.70	7.52	7.97	7.74		
C*	8.57	8.45	8.68	9.25	7.40	8.47		
h*	65.60	68.69	64.57	67.56	64.15	66.11		

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3.9 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Con esta técnica de análisis elemental no destructiva se puede determinar la composición química de materiales. Los resultados se observan en la subsecuente gráfica: Suelo (Arcilla y Arena)

**Figura 99.** FRX de muestra MX-TT.



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

**Tabla 40.** Composición elemental de la muestra MX-TT.

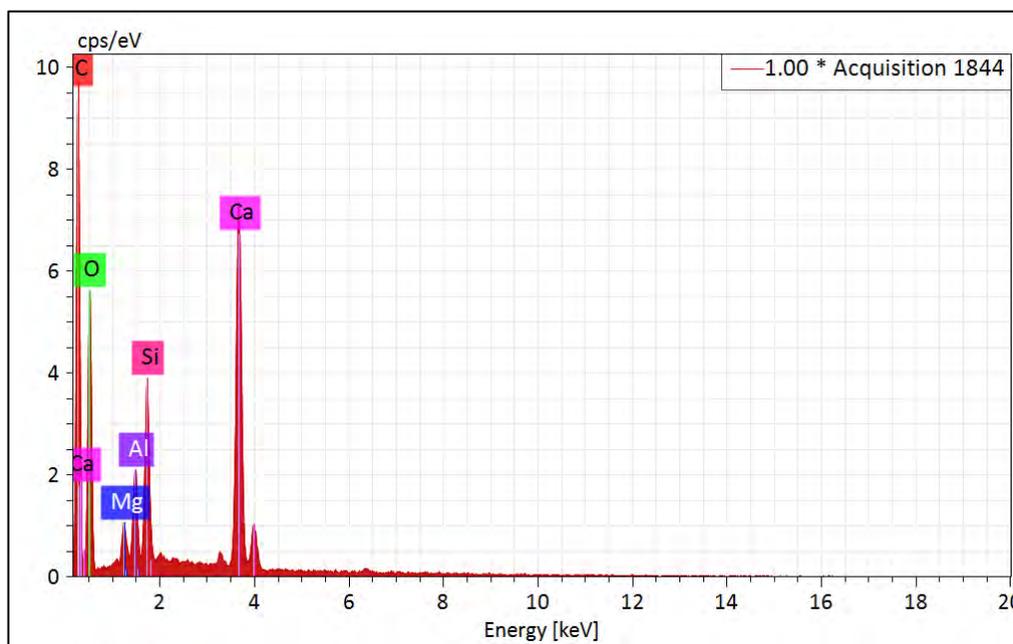
Elemento	No. Atom.	P.Neto	Masa (%)	Masa Norm (%)	Atom. (%)	abs. error (%) $\sigma$	rel. error (%) $\sigma$
Carbono	6	1598	21.4	19.72	28.52	4.31	20.12
Oxigeno	8	9980	51.14	47.14	51.17	7.19	14.05
Sodio	11	1949	3.63	3.35	2.53	0.3	8.14

Aluminio	13	10718	10.91	10.06	6.48	0.57	5.22
Silicio	14	19753	16.87	15.55	9.62	0.76	4.53
Calcio	20	2795	3.42	3.16	1.37	0.15	4.39
Hierro	26	541	1.11	1.03	0.32	0.08	7.63
		Suma	108.48	100.0	100.0		

Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

Se puede observar que el carbón y el silicio predominan en dicha muestra.

**Figura 100.** FRX de cenizas.



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

**Tabla 41.** Composición elemental de cenizas.

Elemento	No. Atómico	Peso Neto	Masa (%)	Masa Norm (%)	Atom. (%)	Error abs. (%) $\sigma$	Error rel. (%) $\sigma$
Carbono	6	11276	61.04	44.29	55.78	8.43	13.81
Oxigeno	8	7174	54.14	39.28	37.14	8	14.77
Magnesio	12	1128	1.13	0.82	0.51	0.1	9.26
Aluminio	13	2708	2.17	1.57	0.88	0.14	6.7
Silicio	14	5591	3.31	2.40	1.29	0.18	5.42
Calcio	20	15239	16.04	11.64	4.39	0.52	3.22
		Suma	137.83	100	100.0		

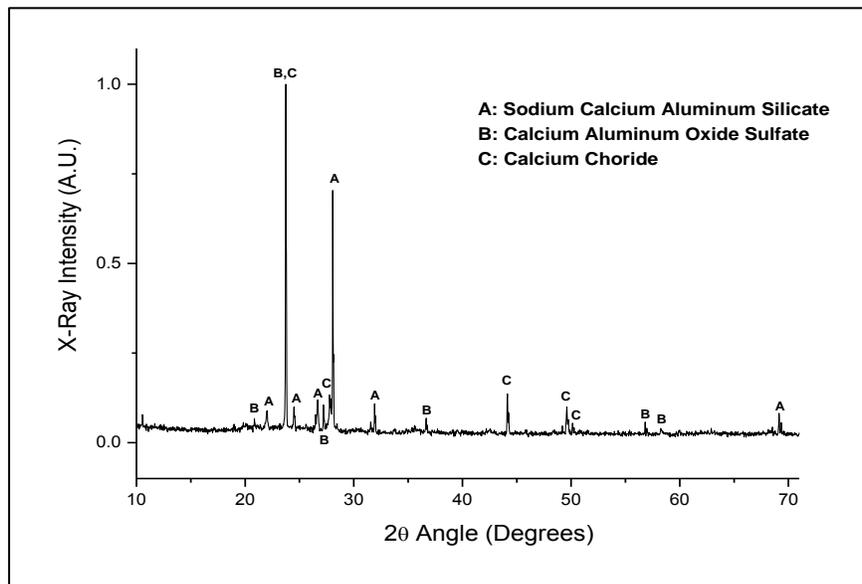
Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

Se puede observar que el carbón, calcio y el silicio predominan en dicha muestra.

### 7.3.10 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X es un proceso utilizado para analizar la estructura cristalina de materiales sólidos, incluyendo minerales, metales, polímeros y otros compuestos.

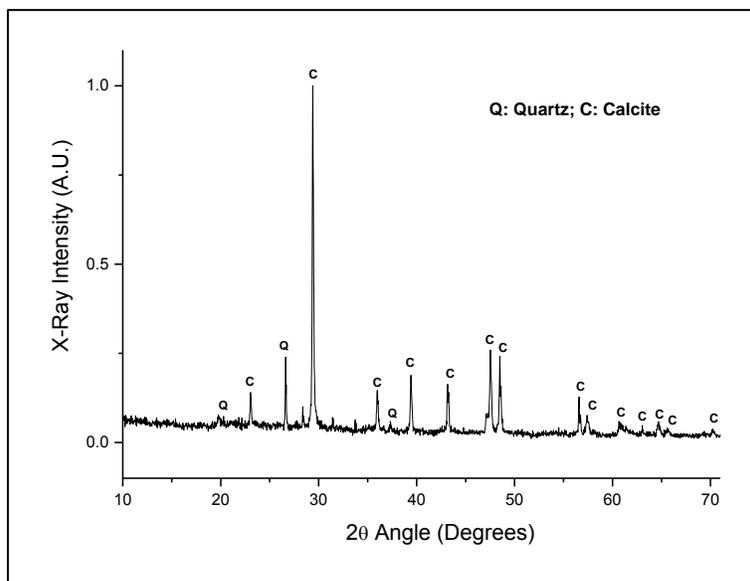
**Figura 101.** DRX de la muestra MX-TT.



Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

En la figura 100 observamos los componentes cristalinos más abundantes en la muestra analizada: A: Silicato de sodio calcio aluminio ( $\text{NaCaAl}(\text{SiO}_4)_2$ ) B: Sulfato de aluminio de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4\text{SO}_4$ ) y C: Cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

**Figura 102.** DRX de cenizas.



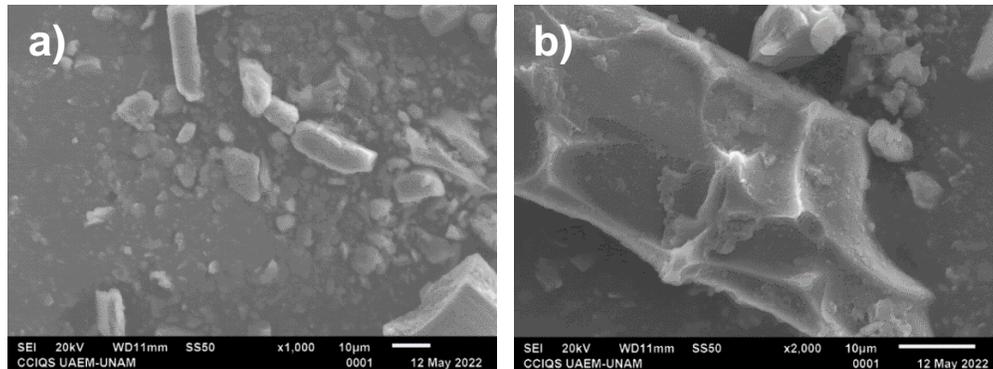
Fuente: (CCIQS UAEM–UNAM, 2023).

Los minerales más importantes que se suelen encontrar en las cenizas volantes son: mullita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3$  &  $2\text{SiO}_2$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematitas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), wustita ( $\text{FeO}$ ), goehita ( $\text{FeO-OH}$ ), pirita ( $\text{S}_2\text{Fe}$ ), calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ), anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), periclusa ( $\text{MgO}$ ) y óxido de calcio libre ( $\text{CaO}$ ). De acuerdo a la figura 101, los elementos más abundantes de la muestra analizada fueron el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y la calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) (Catálogo de residuos utilizables en la construcción, 2013).

### 7.3.11 MICROSCOPIA DE BARRIDO

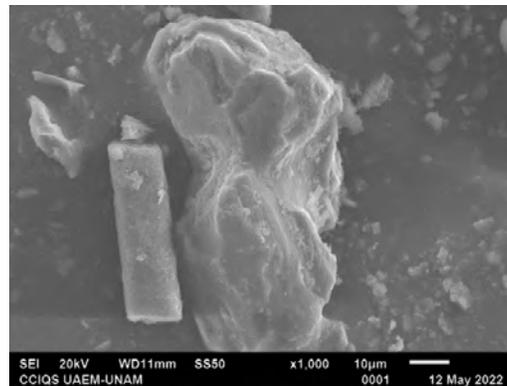
A continuación se muestran las imágenes obtenidas del microscopio electrónico de barrido:

**Figura 103.** Microscopía de arcilla: aumento x 1,000 (a) y 2,000 (b) a  $10\mu\text{m}$ .



Fuente: (CCIQS UAEM-UNAM, 2023)

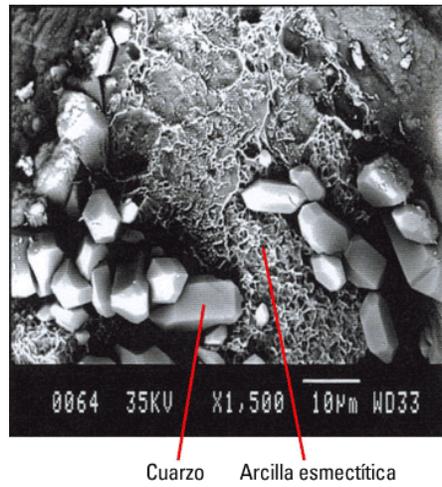
**Figura 104.** Microscopía de arcilla: aumento x 1,000 a  $10\mu\text{m}$ .



Fuente: (CCIQS UAEM-UNAM, 2023).

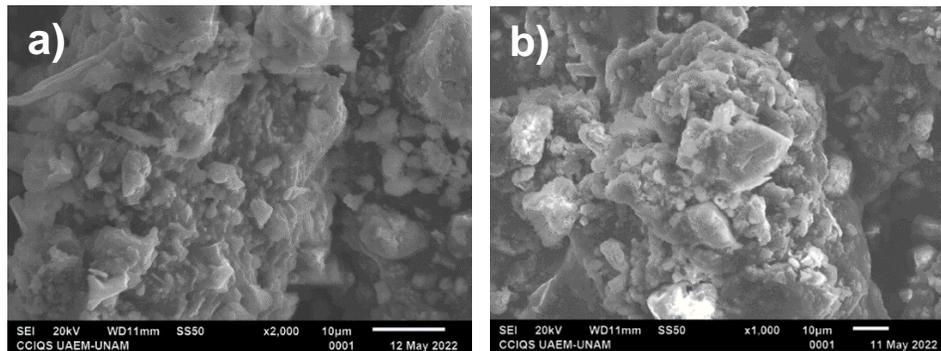
Al comparar las fotografías de las muestras de arcilla con fotografías de otros estudios (ver figura 104) podemos notar que se observan estructuras cristalinas, las cuales corresponden a silicatos ( $\text{SiO}_4$ ) y alúminas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Figura 105.** Microscopía de arcilla: aumento x 1,500 a 10µm.



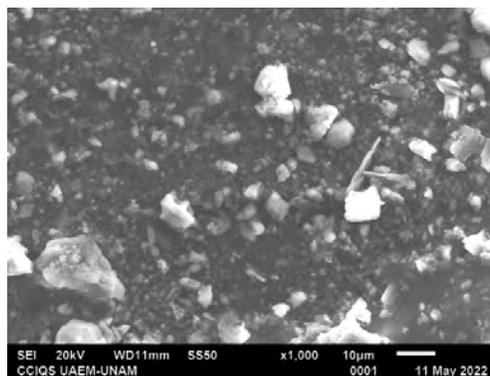
Fuente: (Schlumberger, 2023).

**Figura 106.** Microscopía de ceniza: aumento x 2,000 (a) y x 1,000 (b) a 10µm.



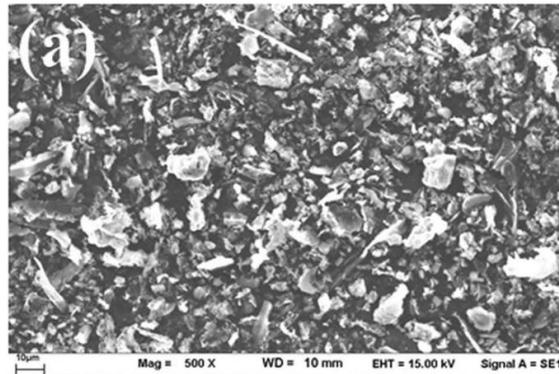
Fuente: (CCIQS UAEM-UNAM, 2023).

**Figura 107.** Microscopía de ceniza: aumento x 1,000 a 10µm.



Fuente: (CCIQS UAEM-UNAM, 2023).

**Figura 108.** Microscopía de ceniza de bagazo de caña: aumento x 500 a 10µm.



Fuente: (Chindaprasirt & Rattanasak, 2020).

Al contrastar las fotografías de las muestras de ceniza con fotografías de otros estudios podemos notar elementos de materia vegetal y mineral (cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) principalmente).

#### 7.4 ENSAYO DE ADOBES MUESTRA

En cuestión de dimensiones, todos presentaron cantidades muy similares, sin embargo, en pesos variaron los resultados. Los adobes más pesados fueron las muestras TT, después de TC6, TC2, TP y TB.

Los promedios de los pesos y dimensiones de los 25 bloques de adobe antes de ser cortados en cubos fueron los siguientes:

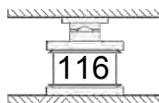
**Tabla 42.** Dimensiones básicas de los bloques.

Muestra	Peso (kg)	SD peso	Largo (cm)	SD largo	Ancho (cm)	SD ancho	Espesor (cm)	SD espesor
MX-TT	15.06	0.426	39.78	0.172	20.02	0.278	11.96	0.205
MX-TP	14.16	0.0459	39.72	0.231	19.76	0.185	11.92	0.296
MX-TB	13.72	0.041	39.82	0.146	19.90	0.282	11.96	0.257
MX-TC2	14.40	0.354	39.84	0.205	19.8	0.213	11.80	0.185
MX-TC6	14.80	0.260	39.86	0.101	19.88	0.132	12.01	0.241

Fuente: Elaboración propia.

##### 7.4.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE

Estos fueron los resultados de los 25 bloques ( en Megapascales “Mpa” y con su deavicion estandar “SD”) para cada una de las composiciones ensayadas en la maquina universal:

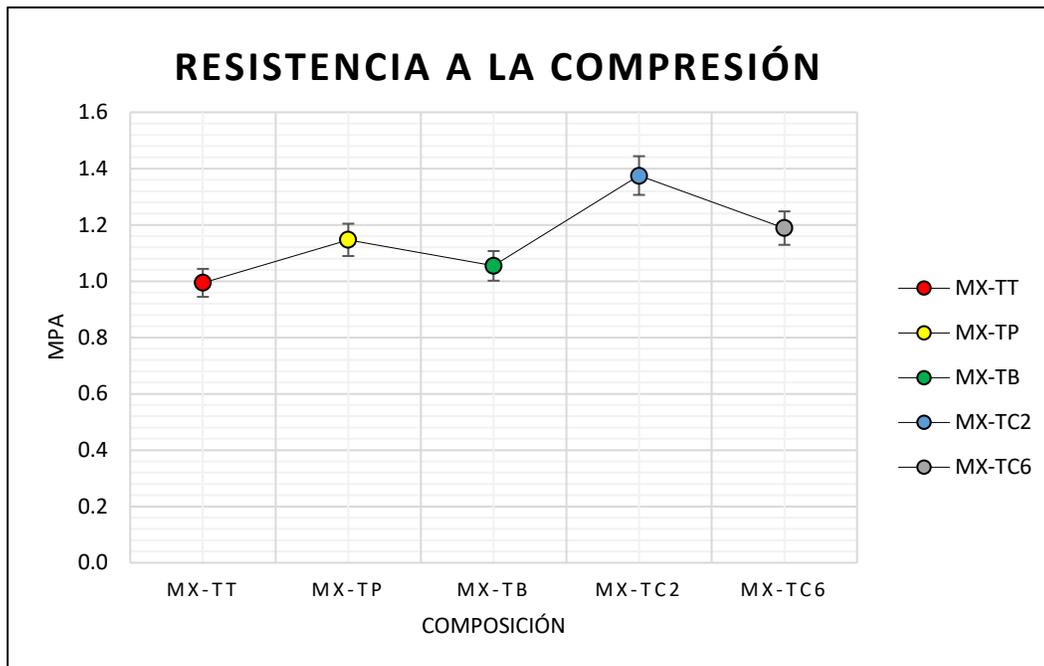


**Tabla 43.** Resumen de resultados a resistencia a compresión.

Muestra	Mpa	SD
TT	0.9941	0.3369
TP	1.1470	0.0868
TB	1.0545	0.0614
TC2	1.3753	0.0777
TC6	1.1887	0.0601

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 109.** Gráfico comparativo de muestras a compresión simple.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla anterior podemos notar que el adobe compuesto por arena, arcilla, bagazo y ceniza al 2% (MX-TC2) fue el que presentó una mayor resistencia a la compresión, le siguió el adobe con ceniza al 6% (MX-TC6), el adobe tradicional (MX-TP), el adobe con bagazo de agave (MX-TB) y por último la muestra de arena y arcilla (MX-TT).

En Perú, la regulación de la construcción con adobe establece que para resistir un terremoto, la unidad de mampostería debe tener una resistencia a la compresión mínima de 1.0 Mpa, conforme a lo establecido en el artículo 8 de la Norma E.080 de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada (Norma Técnica de Edificación NTE E.080, 2000). Observamos que todas nuestras composiciones cumplen el mínimo requerido por esta norma.

## 7.4.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En la tabla 44 se muestran los resultados de resistividad eléctrica según las muestras:

**Tabla 44.** Resumen de resultados de resistividad.

Muestra	$\Omega/\text{cm}^2$	SD
MX-TP	424.800	21.711
MX-TB	306.000	63.769
MX-TC2	200.160	96.895
MX-TC6	147.120	34.633
MX-TT	128.160	35.964

Fuente: Elaboración propia.

## 7.4.3 CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

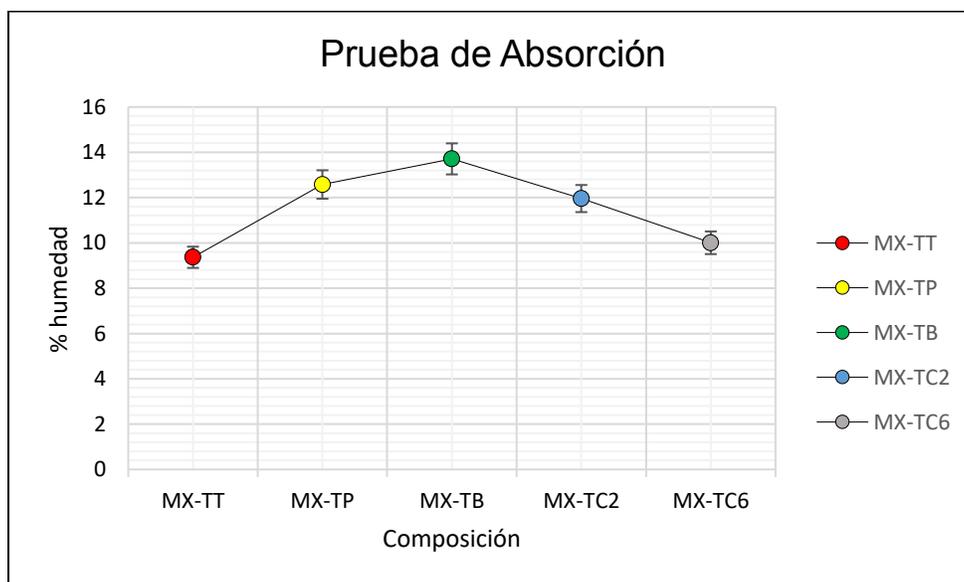
A continuación, los resultados de absorción según las muestras analizadas:

**Tabla 45.** Resumen de resultados de absorción.

Muestra	% Humedad	SD
TB	13.709	0.345
TP	12.578	0.224
TC2	11.958	0.282
TC6	10.006	0.238
TT	9.366	0.345

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 110.** Gráfico comparativo de muestras a absorción.

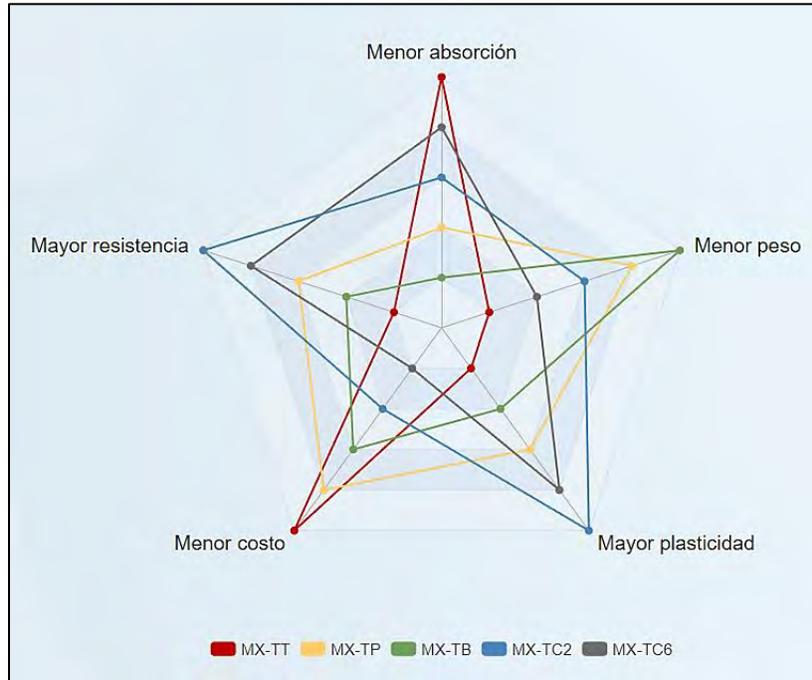


Fuente: Elaboración propia.

## 7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES

En el siguiente gráfico de radar (figura 111) se contrastan las propiedades más significativas de dicho material en cuestión social, económica y medioambiental.

**Figura 111.** Gráfico comparativo de propiedades de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

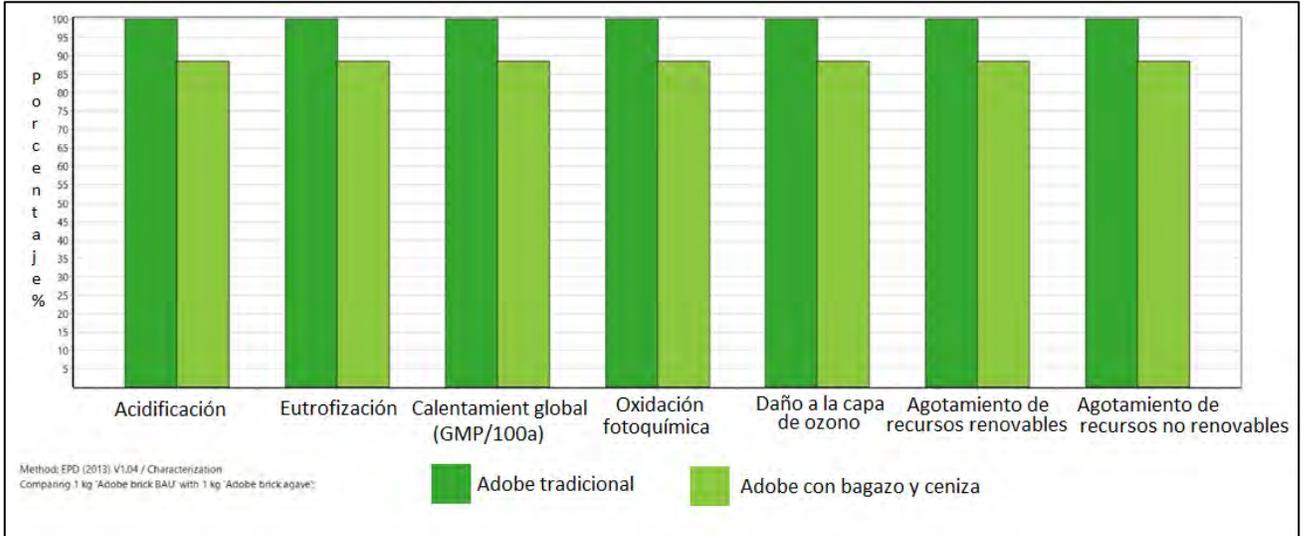
De acuerdo al gráfico anterior podemos notar que la composición TC2 aventaja a las demás en resistencia a la compresión (16.6% mayor que el adobe tradicional) y en plasticidad (1.94% mayor que el adobe tradicional), dos aspectos fundamentales para los materiales constructivos de arquitectura de tierra. Así mismo, esta composición obtuvo un valor medio en capacidad de absorción, costos y ligereza. En otras palabras, obtuvo mejores resultados que aquel compuesto únicamente con bagazo o con un agregado de ceniza al 6%.

## 7.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Los resultados de la figura 117 representan una evaluación mediante el modelo de cálculo EPD 2013, en los 7 problemas ambientales que se describieron en el apartado 3.1.4. Los métodos de cuantificación son estandarizados y los aceptados por los estándares internacionales de las declaraciones ambientales de producto (EPD por sus siglas en inglés) e ISO 14040. Los valores que se encuentran en la tabla 63, son el resultado de la evaluación del adobe como ladrillo estructural así como los valores de la figura 117. Cabe

mencionar que para obtener dicho análisis es necesario especificar los costos de materia prima, cantidades, procesos energéticos, combustible para distribución, vida útil, etcétera.

**Figura 112.** Impactos ambientales de adobe tradicional y adobe con bagazo y ceniza.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 46.** Evaluación de los adobes como elementos estructurales.

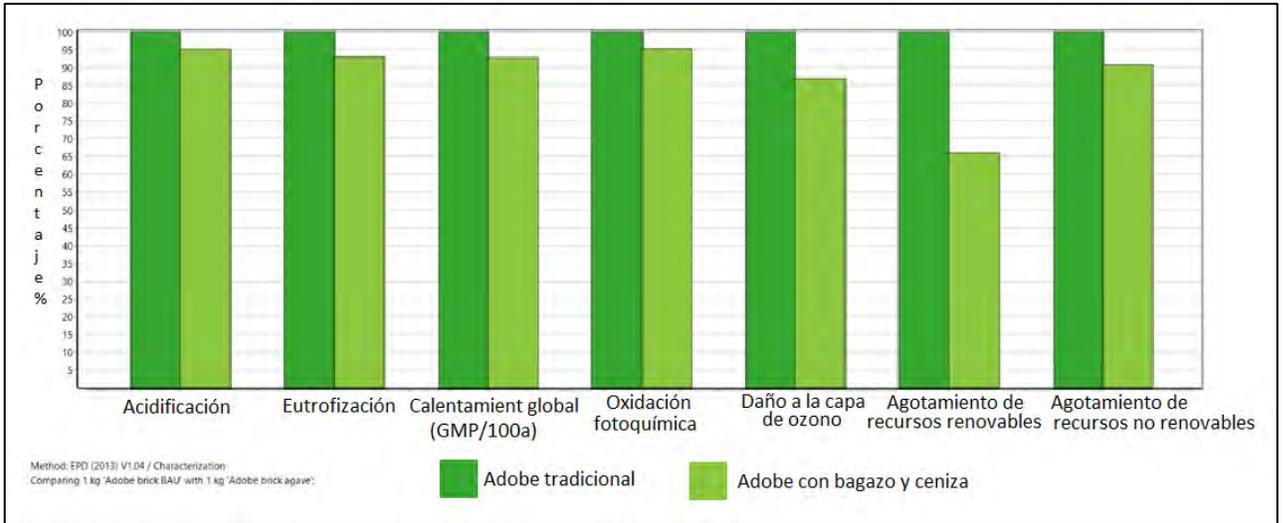
SimaPro 9.0.0.49	Evaluación de impactos	Fecha:	12/05/2023
Calculo:	Comparativa		
Resultados:	Unidades		
Producto 1:	1 m2 Adobe con agave		
Producto 2:	1 m2 Adobe tradicional		
Categoría de impacto			
Acidificación (no incl. destino)	kg SO <sub>2</sub> eq.	Adobe tradicional	Adobe con agave
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> eq.		
Calentamiento global (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq.	0.000163405	0.000144736
Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	3.042E-05	2.6945E-05
Agotamiento de la capa de ozono (ODP) (opcional)	Kg CFC-11 eq.	0.024199389	0.021434927
Agotamiento abiótico (opcional)	kg Sb eq.	7.65701E-06	6.78215E-06
Agotamiento abiótico de recursos no renovables (opc.)	MJ	1.8926E-09	1.67649E-09

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la figura 118 y tabla 66 corresponden a un cálculo bajo el modelo EPD 2013, usando SIMAPRO 9, y bases de datos de Ecoinvent 3.5 y agrifood. Estos resultados evalúan al adobe con las mismas reglas de categoría de producto (PCR por sus siglas en inglés), pero con la unidad funcional de un metro cuadrado de bloques,

empleados para fachada (en inglés: *facing*), ya que anteriormente se evaluaron 1000 kg de material como unidad funcional de un adobe estructural.

**Figura 113.** Evaluación de las composiciones para fachada.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 47.** Evaluación de los adobes como elementos para fachada.

SimaPro 9.0.0.49	Evaluación de impactos	Fecha:	12/05/2023
Calculo:	Comparativa		
Resultados:	Unidades		
Producto 1:	1 m2 Adobe con agave		
Producto 2:	1 m2 Adobe tradicional		
Categoría de impacto	Unidad	Adobe con agave	Adobe tradicional
Acidificación (no incl. destino)	kg SO <sub>2</sub> eq.	0.127710343	0.121225311
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> --- eq.	0.024738512	0.022950248
Calentamiento global (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq.	19.78830596	18.31184673
Oxidación fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	0.005948381	0.005665641
Agotamiento de la capa de ozono (ODP) (opcional)	kg CFC-11 eq.	1.75653E-06	1.52282E-06
Agotamiento abiótico (opcional)	kg Sb eq.	5.75232E-05	3.81143E-05
Agotamiento abiótico de recursos no renovables (opc.)	MJ.	215.5912235	195.310403

Fuente: Elaboración propia

Para poder realizar una comparativa sustancial, compararemos los datos del ACV del adobe con bloques de diferentes concretos. Dichos datos se pueden observar en las siguientes tablas y gráficos:

**Tabla 48.** Impactos ambientales de distintos concretos y adobe con bagazo.

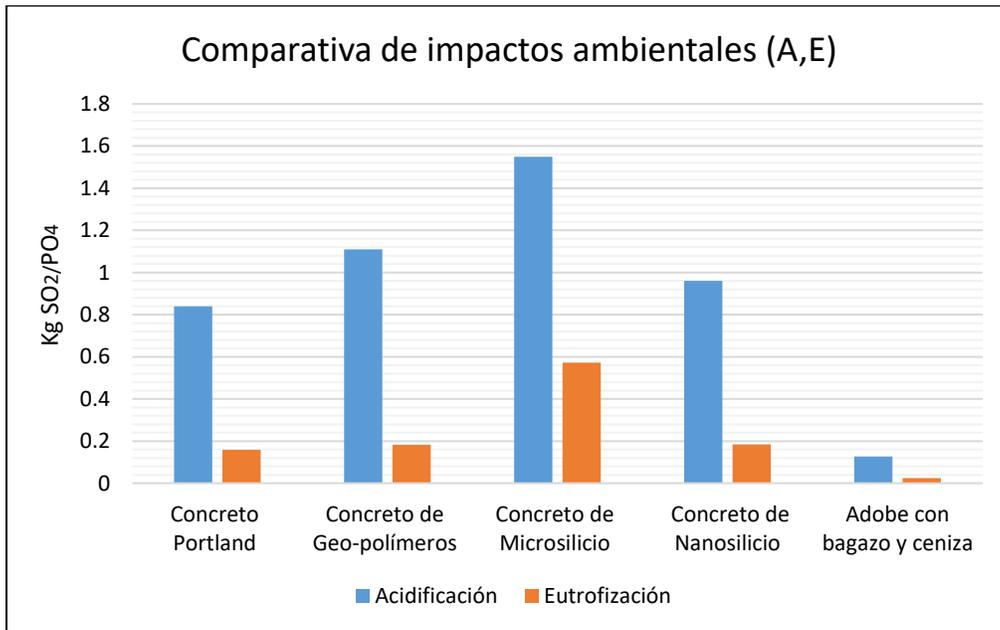
	Unidad indicador	Concreto Portland	Concreto de Geo-polímeros	Concreto de Microsilicio	Concreto de Nanosilicio	Adobe MX-TBC
Acidificación	Kg SO <sub>2</sub> eq.	0.84	1.11	1.55	0.96	0.12122
Eutrofización	Kg PO <sub>4</sub> eq.	0.159	0.183	0.572	0.185	0.02295
Calentamiento global (GWP)	Kg CO <sub>2</sub> eq.	386.44	286.85	605.32	453.31	18.3118
Toxicidad humana	1,4-DB eq.	35.68	72.35	182.52	41.04	N/A

Fuente: Editado de (Asadollahfardi, Katebi, Taherian, & Panahandeh, 2021).

De acuerdo a la figura 112 y 113 el adobe adicionado con bagazo y ceniza es un 85% menos contaminante que un bloque de concreto portland, tanto en acidificación como en eutrofización, y un 95% menos contaminante en gases de efecto invernadero.

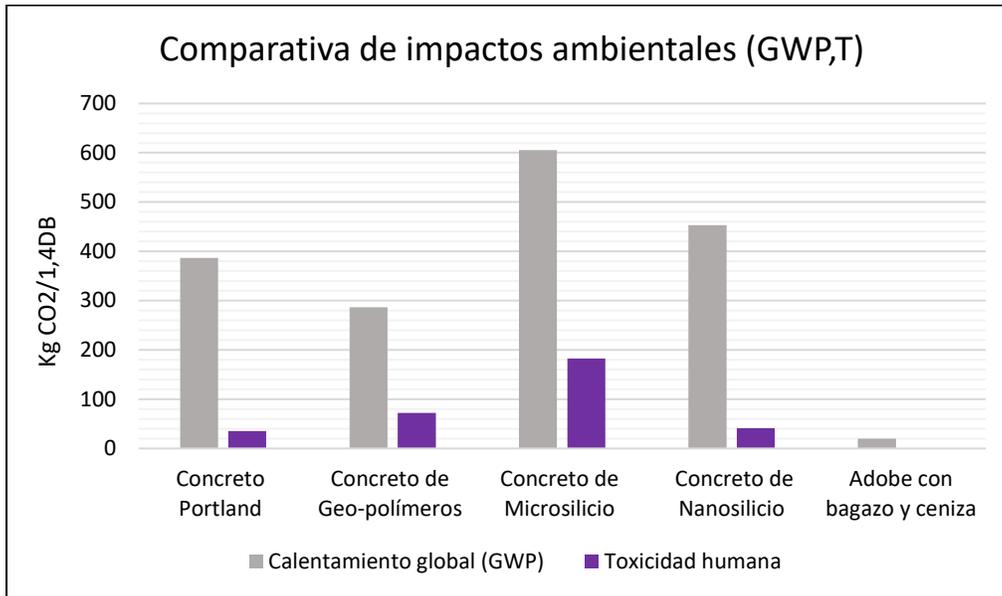
Para estas evaluaciones se consideró como frontera de la cuna a la puerta (*cradle to gate*). Se consideró que las fibras, la arena y arcilla, no se transportaban; se consideraron cero impactos a la puerta del lugar de producción. Los impactos de la producción y distribución del agua, así como de la producción de la arena y arcilla, fueron tomados de una base de datos de Ecoinvent, la base de datos con mayor aceptación global.

**Figura 114.** Comparativa de composiciones e impactos ambientales.



Fuente: Editado de (Asadollahfardi, Katebi, Taherian, & Panahandeh, 2021).

**Figura 115.** Comparativa de composiciones e impactos ambientales.



Fuente: Editado de (Asadollahfardi, Katebi, Taherian, & Panahandeh, 2021).

## VIII. CONCLUSIONES

Al día de hoy siguen existiendo numerosos países donde la arquitectura de tierra continúa su uso extensivamente. A pesar de las nuevas tendencias constructivas y materiales, México sigue siendo un país con gran cantidad de viviendas construidas con adobe. En nuestro país, las técnicas de adobe varían dependiendo de la región, la disponibilidad de recursos, la geografía, el clima, la cultura, entre muchos otros factores. En esta investigación se logró caracterizar las muestras de adobe de Santa María la Asunción, Estado de México y compararla con otras composiciones propuestas. Dichas muestras fueron las siguientes: a) adobe tradicional (arcilla, arena y pasto seco) b) adobe de tierra (arena y arcilla) c) adobe adicionado con bagazo de agave c) adobe adicionado con bagazo de agave y ceniza al 2% y e) adobe adicionado con bagazo de agave y ceniza al 6%.

El adobe adicionado con fibra de bagazo de agave *Angustifolia Haw* y ceniza como estabilizador, presentó algunas ventajas mecánicas sobre el adobe testigo, por ejemplo, una resistencia mayor a la compresión en un 19.9%. Todas las composiciones puestas a prueba cumplieron con la norma NTE-E.080 de resistencia a la compresión mínima para construcción con adobe.

La caracterización de la fibra demostró tener un porcentaje del 16% de bagazo con respecto al peso del adobe, un promedio de longitud de fibra de 1.10 cm a 3.85 cm y una

orientación asimétrica en la mezcla. Factores promedio en las fibras empleadas para la elaboración de bloques de adobe.

En comparación con todas las muestras, la composición TC2 sobresale de las demás en cuanto a su resistencia a la compresión, superando al adobe tradicional en un 19.9%; también presenta una mayor plasticidad, con un aumento del 1.94%. Ambos aspectos son fundamentales para los materiales de construcción de arquitectura de tierra. El adobe reforzado con bagazo de agave y ceniza al 2% es más liviano que el adobe tradicional, y un factor de absorción de humedad intermedio; es decir, en promedio sus propiedades resultaron ser mejores que el adobe elaborado por los constructores de Santa María la Asunción, Zumpahuacán Estado de México. Por lo tanto es una buena alternativa para aprovechar el subproducto o residuo de la industria mezcalera e integrarlo al proceso productivo del adobe y practicar la economía circular en la región. En otras palabras, la composición TC2 logró resultados superiores en comparación con aquellas que estaban compuestas únicamente con bagazo o con un agregado de ceniza al 6%.

Las pruebas de difracción y fluorescencia de rayos x fueron útiles para caracterizar la composición química de las muestras, se observaron principalmente silicatos ( $\text{SiO}_4$ ) y alúminas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) así como cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ). La técnica de microscopía permitió corroborar morfológicamente las estructuras cristalinas propias de las arcillas y arenas.

Se realizó un análisis de ciclo de vida que determinó que este material constructivo comparado con otros de su mismo rubro (concreto), es un 85% menos contaminante que un bloque de concreto tipo portland, tanto en acidificación como en eutrofización, y un 95% menos contaminante en gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ) en su producción.

Al realizar un diagnóstico de resistencia, ligereza plasticidad, costos, impactos ambientales y colorimetría, reafirmamos por qué el adobe sigue siendo una alternativa constructiva sustentable.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D., & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, XXXIV, 296-305.
- Andrew, R. (2018). Global CO2 emissions from cement production, 1928–2017. *Earth System Science Data*, X(4), 2213-2239.
- Arévalo, G., & Chávez, C. (2006). *Manual de mecánica de suelos II*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Arévalo, G., & Chávez, C. (2008). *Manual de mecánica de suelos I*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Arroyo, F. R. (2018). La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *INNOVA Research Journal*, III(12), 78-98. doi:<https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.786>
- Arroyo-Matus, R., Sánchez-Tizapa, S., & Catalán-Quiroz, P. (2013). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. (U. A. Yucatán, Ed.) *Ingeniería*, XVII(3), 167-177.
- Asadollahfardi, G., Katebi, A., Taherian, P., & Panahandeh, A. (2021). Environmental life cycle assessment of concrete with different mixed designs. *International Journal of Construction Management*, 21(7), 665-676. doi:10.1080/15623599.2019.1579015
- Augé, M. (2000). *Los no lugares espacios del anonimato, una antropología de la sobremodernidad*. Barcelona: Gedisa.
- Babé, C., Kidmoa, D.-K., Ahmat, T., Mvondoc, R.-R. N., Boumd, R.-B. E., & Noël, D. (2020). Thermomechanical characterization and durability of adobes reinforced with millet waste fibers (sorghum bicolor) Case Studies. *Construction Materials Journal*, XIII, 1-13.
- Baglioni, E., Fratini, F., & Rovero, L. (2010). The materials utilised in the earthen buildings sited in the Drâa Valley (Morocco): mineralogical and mechanical characteristics. *6 Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal and 9*

- Seminário Ibero-Americano de Construção e Arquitectura com Terra.*  
Coimbra, Portugal.
- Bando Municipal. (2021). *H. Ayuntamiento Constitucional 2019-2021.* Gobierno de Zumpahuacan.
- Barba Cruz, D. (2015). *Diseño sustentable sensorial emocional su aplicación para el aprovechamiento de espacios en la vivienda.* Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Benites, V. (2017). *Adobe estabilizado con extracto de cabuya (Furcraea andina).* Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.: Universidad de Piura.
- Bolaños, J. (2016). *Resistencia a compresión, flexión y absorción del adobe compactado con adición de goma de tuna.* Lima, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Bryman, A. (2016). *La Disneyización sustituye la banalidad de lo cotidiano por experiencias espectaculares.* Thorpe, Christopher.
- Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J., Arroyo-Matus, R., & Galván, A. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio. *Acta Universitaria, XXIX.*
- CCIQS UAEM–UNAM. (2023). *Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable.* Obtenido de <http://www.cciqs.unam.mx/>
- Cedeño Valdiviezo, A. (2010). Materiales. *Revista de Arquitectura, 12,* 100-110.
- CEDEX. (2013). *Catálogo de residuos utilizables en la construcción.* (G. d. España, Editor) Obtenido de Centro de estudios y experimentación de obras públicas: <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/valorizacion/propiedades-del-residuo/23/las-cenizas-volantes.html>
- CEPAL. (2018). Reflexiones sobre el desarrollo en América Latina y el Caribe: conferencias magistrales 2016-2018 . Santiago de Chile.
- Chavez, Y. (2019). *Propiedades físico y mecánicas del adobe compactado con incorporación de fibras de coco.* Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte.

- Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U. (2020). Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. *Sci Rep*, 10(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-66885-y>
- Colozio, M., Sato, A., & Giuseppe, D. (2013). Proposal of a Study on the Insertion of Alternative Techniques and Materials for the Development of Packaging Through Surface Design. *International journal of Science Commerce and Humanities*, 1(5), 67-76.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2008). *Edificación sustentable en América del Norte*. Québec: Comisión para la Cooperación Ambiental. Recuperado el 27 de Enero de 2023
- CONABIO. (2006). *Mezcales y diversidad*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONEVAL. (2019). *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Recuperado el 13 de Febrero de 2020, de [https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Documents/Pobreza\\_18/Pobreza\\_2018\\_CONEVAL.pdf](https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Documents/Pobreza_18/Pobreza_2018_CONEVAL.pdf)
- Cortés, H., & Peña, J. (2015). De la sostenibilidad a la sustentabilidad. Modelo de desarrollo sustentable para su implementación en políticas y proyectos. *Escuela de Administración de Negocios*(78), 40-54.
- Cutiño, M., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 1(22), 138-151. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>
- De la Rosa, E. (2020). ¡Salud! Tequila superó récord de producción en 2019. *Milenio*.
- Del Pino, V., & Estramil, V. (2015). *Arquitectura con tierra. Bioconstrucción en cooperativas de viviendas por ayuda mutua*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Domingo Palomares, H. (2015). Desarrollo de la identidad múltiple. La identidad social, cultural, cívica y cosmopolita. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 447-455.

- Ecodisruption. (2021). *Bioeconomía circular*. Recuperado el 21 de Marzo de 2021, de <https://ecodisruption.com/index.php/services/>
- E-paint. (2023). *E-paint Co. UK*. Obtenido de [www.e-paint.co.uk/convert-lab.asp](http://www.e-paint.co.uk/convert-lab.asp)
- Falls, V., Dianelis, & Chaos Yeras, M. (2018). El espacio habitable. Del movimiento moderno a la actualidad, ruptura y continuidad. *Revista de Arquitectura, XXIII(35)*, 42-51.
- Fao-Swalim, P; Nairobi, K.-U; Mayor, & Simón, S. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. (R. Vargas, Trad.) Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fernández Alcalá, J. (2015). The principles of circular economy in product engineering. *19th International Congress on Project Management and Engineering*. Granada.
- Gama-Castro, J., Cruz y Cruz, T., Pi Puig, T., Alcalá Martínez, R., Cabadas Báez, H., Jasso Castañeda, C., . . . Vilanova de Allende, R. (2012). Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LXIV(2)*, 177-188.
- García Canclini, N. (1999). *La globalización imaginada*. Buenos Aires: Paidós.
- Gobierno del Estado de México. (2018). *Atlas de riesgos, Zumpahuacán 2016-2018*.
- Gobierno Federal. (2021). *REGLAS de Operación del Programa de Vivienda Social para el ejercicio fiscal 2021*. México: Diario Oficial.
- Gonzáles de La Cotera, M. (1995). *Construcciones con adobe*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Guerrero-Baca, F. (2007). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. *APUNTES, XX(2)*, 182-201.
- Hernández Moreno, S., Ocaña Ponce, J. A., & Mejía López, M. (2014). Application of ISO 15686 to estimate service life of a dome built with adobe technology in the city of Toluca, México. *Acta Universitaria, XXIV(6)*, 16-20.
- Hernandez, I. (2016). *Block de adobe con fibra de platanal aplicado al proyecto centro de rehabilitación en palenque Chiapas*. México: Instituto Politécnico Nacional.

- Hernandez-Omaña, J., De Hoyos-Martínez, J. d., & Estrada-Olivella, R. (2017). *En búsqueda del nuevo paradigma del diseño arquitectónico*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Hernández-Rivera, J., Alcántara-Salinas, G., Blanco-Orozco, N., Houbron, E., & Pérez-Sato, J. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Posgrado y Sociedad*, XV(1), 57-67.
- Hurtado-Saldaña, O. (2018). *Características físicas y mecánicas de unidades de adobe con hojas de pino y aserrín en el distrito de Socotá*. Cajamarca, Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- Imagen-digital. (2023). *El espacio de color lab*. Obtenido de [http://www.gusgsm.com/el\\_espacio\\_de\\_color\\_lab](http://www.gusgsm.com/el_espacio_de_color_lab)
- INEGI. (2009). *Instituto Nacional de Estadística Y Geografía*. México.
- Ipohorsky, M. (2011). Una mirada al microscopio electrónico de barrido. *Materiales*(4), 50-52.
- Latif, R., Wakeel, S., Zaman Khan, N., Noor Siddiquee, A., Lal Verma, S., & Akhtar Khan, Z. (2018). Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, XXXVIII(1), 15-30. doi:<https://doi.org/10.1177/0731684418802022>
- Leff, E. (2014). *La apuesta por la vida. Imaginación sociológica e imaginarios sociales en los territorios ambientales del sur*. México: Siglo XXI.
- Lejano, B., & Pineda, S. (2018). The effects of different natural fibers on the strength of compressed stabilized earth blocks (cseb). *GEOMATE*, XIV(42), 37-43.
- Lett, L. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, XXVII(1), 1-3.
- Liberatore, D., Spera, G., Mucciarelli, M., Gallipoli, M., Santarsiero, D., & Tancredi, C. (2006). Typological and experimental investigation on the adobe buildings of Aliano (Basilicata, Italy). *5th international conference on structural analysis of historical constructions* (págs. 851-858). Lourenço PB, Roca P, Modena C, Agrawal S.

- Martinez-Ripoll, M. (2023). *Cristalografía*. Obtenido de Dept. de Cristalografía y Biol. Estructural: <https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/>
- Meli, R. (2005). Experiences in Mexico on the reduction of seismic vulnerability of adobe constructions. *Proceedings of SismoAdobe 2005*. Lima, Peru.
- Mello, M., Vinicius dos Santos, E., Lunardi Dorneles, R., Toneto da Costa, G., Rosa, L., & Kirchhof Dias, E. (2017). A importância de estratégias bioclimáticas aplicadas no projeto arquitetônico. *Administração da Universidade Federal de Santa Maria*, X, 9-25.
- Metalinspec. (2022). *¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido?* Obtenido de <https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido>
- Millogo, Y., Hajjaji, M., & Ouedraogo, R. (2008). Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Construction and Building Materials*, XXII(12), 2386–2392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002>
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual* (2a ed.). Acevedo.
- Miranda, S., Vancouver, B., & Vera, R. (2004). Experimental study of retrofitting techniques for adobe walls. *3 th World Conference on Earthquake Engineering*. Obtenido de: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_2861.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2861.pdf)
- Moreno, Y. (2020). Recuperado el 5 de Noviembre de 2021, de <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/limites-atterberg/>
- Morin, E. (2014). *La vía para el futuro de la humanidad*. Barcelona: Paidós.
- Muriel, D. (2016). El modelo patrimonial: el patrimonio cultural como emergencia tardomoderna. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural.*, XIV(1), 181-192.
- Naturpiedra, J. (2021). *Naturpiedra, JBERNARDOS*. Recuperado el 24 de Marzo de 2021, de <https://www.naturpiedra.com/es/sostenibilidad-en-la-construccion-con-piedra-natural/>
- NMAC. (2015). *New Mexico Adobe Construction*. New Mexico: New Mexico State Records Center and Archives.
- (2000). *Norma Técnica de Edificación NTE E.080*. Lima.

- ONNCCE. (2004). *NMX-C-037-ONNCCE-2004*. México: Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2005). *NMX-C-441-ONNCCE-2005*. Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2012). *NMX-C-404-ONNCCE-2012*. México: Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2013). *NMX-C-036-ONNCE-2013*. México: Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014*. México: Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ortega, J. (2009). El patrimonio territorial: El territorio como recurso cultural y económico. *Innovación y Experiencias Educativas*(14), 33-48.
- Ortiz, D. Y. (2019). *Efectos de la incorporación de cuatro porcentajes (2.5%, 5%, 7.5% y 10%) de estiércol de caballo en la resistencia a la compresión y flexión del adobe*. Facultad de Ingeniería. Cajamarca, Perú: Universidad Peruana del Norte.
- Palma, C. d. (2000). Agaves productores de fibras duras en el estado de Oaxaca, México. *Sociedad Botánica de México*, 66, 93-102.
- Portal de Agroproductores. (8 de Febrero de 2020). *Producción de agave en México*. Recuperado el 22 de Junio de 2021, de <https://agroproductores.com/produccion-de-agave-en-mexico/#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20existen%20sembradas%20109%2C568,utilizados%20en%20la%20industria%20mezcalera>.
- Preciado, A., Ramirez-Gaytan, A., Santos, J. C., & Rodriguez, O. (2019). Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, XLIV. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101425>.
- Pujadas, C. (2011). Desarrollo sostenible o sustentable? *ADN*, 6, 28.
- Puy-Alquiza, M., Miranda-Avilés, R., Ordaz-Zubia, V., Moncada, C., Zanon, G., Salazar-Hernández, M. d., & Loza-Aguirre, I. (2019). The mine tailings as

- construction material in the viceregal period: Case study in Guanajuato city, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, LXXI(2), 543–564. doi:<https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n2a18>
- Ramírez, B. (2001). *Estudio del impacto ambiental en el proceso de elaboración de ladrillo en la comunidad del Chote*. Universidad Veracruzana.
- Ramírez-Rodríguez, M., Aguiluz-León, J., & Gutiérrez-Martínez, R. (2013). Prototipo de vivienda de adobe con energías renovables: caso de estudio localidad de Raíces, Área Natural Protegida del Parque Nacional del Nevado de Toluca, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, XX, 231-237.
- Rieznik, N. (2023). *Análisis del ciclo de vida*. (B. CF+S., Editor) doi:<http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html>
- Rivera-Salcedo, H., Valderrama-Gutiérrez, O., Daza-Barrera, Á., & Plazas-Jaimes, G. (2021). Adobe como saber ancestral usado en construcciones autóctonas de Pore y Nunchía, Casanare (Colombia). *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 23(1), 74-85. doi:10.14718/RevArq.2021.2762
- Rodríguez-Díaz, M. A., Saroza-Horta, B., Nolasco Ruiz-Sanchez, P., Barroso-Valdés, I. J., Ariznavarreta-Fernández, F., & González-Coto, F. (2014). Some recommendations for the construction of walls using adobe bricks. *Dyna*, LXXXI(185), 145-152.
- Romero, B. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. *Boletín IIE: Tendencias Tecnológicas*, 91-97.
- Rotondaro, R., & Mellace, R. F. (2004). Actas del II Seminario Iberoamericano de construcción con tierra. *Tecnología de tierra para mejorar aspectos constructivos de la vivienda de interés social* (págs. 103-113). Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- Roux-Gutiérrez, S., & Olivares-Santiago, M. (2002). Utilización de ladrillos de adobe estabilizados con cemento portland al 6% y reforzados con fibra de coco, para muros de carga en Tampico. *Informes de la Construcción*, LIII(478), 39-50.
- Ruiz, G., Delgado, L., & Hernández, E. (1993). *Edificaciones de bajo coste*. Madrid, España: ONG SUR.

- Ruiz, J., & Vidal, F. (2015). Caracterización mecánica de piezas de adobe fabricado en la región de Tuxtla Gutiérrez. *ESPACIO I+D, Innovación más Desarrollo*, IV(7), 130-154.
- Ruiz-Serrano, M. (2019). *Conformación de bloques de adobe con residuos de agave "Angustifolia Haw". Estrategia para el desarrollo local sustentable en Santa María La Asunción, Zumpahuacán, Estado de México*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Saenz-Pérez, J. V. (2015). *Bioconstrucción y arquitectura bioclimática para la ejecución de una vivienda ecológica unifamiliar*. Valencia: Escuel Técnica Superior de Ingeniería de Edificación: Universitat Politècnica de València.
- Sahu, P., & Gupta, M. (2017). Sisal (Agave sisalana) fibre and its polymer-based composites: A review on current developments. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, XXXVI(24), 1759-1780. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684417725584>
- Sánchez, C., & Jiménez, E. (2010). La vivienda rural. Su complejidad y estudio desde diversas disciplinas. *Luna Azul*(30), 174-196.
- Saroza, B., Rodríguez, M., Menéndez, J., & Barroso, I. (2008). Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescencio Valdés, Villa Clara, Cuba. *Informes de la Construcción*, 60, 41-47.
- Sasui, A., Watcharin, J., & Sirimas, H. (2018). The Effects of Raw Rice Husk and Rice Husk Ash on the Strength and Durability of Adobe Bricks. *Civil Engineering Journal*, IV(4), 732-742.
- Schlumberger. (2023). *Energy Glossary*. Obtenido de [https://glossary.slb.com/es/terms/s/smectite\\_clay](https://glossary.slb.com/es/terms/s/smectite_clay)
- Serrano-Barquín, H., Serrano-Barquín, C., Ruiz-Serrano, M., Zarza-Delgado, M. P., Ruiz-Serrano, E., & Estrada-Olivella, R. (2020). *El adobe. Su tradición simbólica y arquitectónica en el Estado de México*. Ciudad de México: Eón.
- SIAP. (2006). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Informe anual de producción de mezcal*. Estado de México, México.

- Silva-Santos, L., Hernández-Gómez, L. H., Caballero-Caballero, M., & López-Hernández, I. (2009). Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the angustifolia Haw Agave in Function of their Length. *Applied Mechanics and Materials*, 15, 103-108. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.15.103
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, XXVIII(1), 36-44.
- Soria-Santamaría, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales De Construcción*, XXXIII(190-191), 69-84.
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1997). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales*. Saint Gallen : SKAT Publications. Obtenido de <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms06.htm>
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1997). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales*.
- Techio, E. M., Pereira Gonçalves, J., & Poliana Neres, C. (2016). Representação social da sustentabilidade na construção civil: a visão de estudantes universitários. *Ambiente & Sociedade*, XIX(2), 187-205.
- UNESCO. (2011). *World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP)*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2020, de <https://whc.unesco.org/en/earthen-architecture/>
- Universidad de Burgos. (2020). *Universidad de Burgos*. Recuperado el 25 de abril de 2023, de <https://www.ubu.es/>
- Valverde, L. (2019). *Resistencia a la compresión en adobe, estabilizado en 2% y 3% con cenizas de cascara de huevo y cascara de arroz*. Chimbote, Perú: Universidad San Pedro.
- Vázquez García, L. M., & Munguía Lino, G. (2015). *Fibras vegetales y las artesanías en el Estado de México*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Zumpahuacán, A. d. (2019). *Plan Municipal de Desarrollo Zumpahuacán 2019-2021*.

## X. ANEXOS

### ANEXO I: PROPIEDADES NATURALES

En las siguientes tablas se exponen los resultados de los contenidos de agua de las muestras analizadas:

**Tabla 49.** Propiedades naturales de la arcilla.

Muestra	W (peso muestra húmeda, gr)	W (peso muestra seca, gr)	Peso Agua (gr)	Agua (%)
1	200	153	47	30.72
2	200	153	47	30.72
3	200	154.2	45.8	29.70
4	200	156.8	43.2	27.55
5	200	152.4	47.6	31.23
6	200	152	48	31.58
7	200	156.6	43.4	27.71
8	200	152.6	47.4	31.06
Promedio	200	153.825	46.175	30.035

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 50.** Propiedades naturales de la arena.

Muestra	W (peso muestra húmeda gr)	W (peso muestra seca gr)	Peso Agua (gr)	Agua (%)
1	200	167.8	32.2	19.19
2	200	168.4	31.6	18.76
3	200	167.4	32.6	19.47
4	200	169.6	30.4	17.92
5	200	167.8	32.2	19.19
6	200	167.2	32.8	19.62
7	200	168.6	31.4	18.62
8	200	167	33	19.76
Promedio	200	167.975	32.025	19.068

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 51.** Propiedades naturales de la muestra MX-TT.

Muestra	W (peso muestra húmeda gr)	W (peso muestra seca gr)	Peso Agua (gr)	Agua (%)
1	200	159	41	25.79
2	200	160	40	25.00
3	200	158.2	41.8	26.42

4	200	159.9	40.1	25.08
5	200	158.6	41.4	26.10
6	200	161.1	38.9	24.15
7	200	159.6	40.4	25.31
8	200	157.4	42.6	27.06
Promedio	200	159.225	40.775	25.614

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 52.** Propiedades naturales de la muestra MX-TC2.

Muestra	W (peso muestra húmeda gr)	W (peso muestra seca gr)	Peso Agua (gr)	Agua (%)
1	200	161.1	38.9	24.15
2	200	159.1	40.9	25.71
3	200	154.2	45.8	29.70
4	200	157.7	42.3	26.82
5	200	159	41	25.79
6	200	160	40	25.00
7	200	158.2	41.8	26.42
8	200	159.9	40.1	25.08
Promedio	200	158.65	41.35	26.083

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 53.** Propiedades naturales de la muestra MX-TC6.

Muestra	W (peso muestra húmeda gr)	W (peso muestra seca gr)	Peso Agua (gr)	Agua (%)
1	200	161.1	38.9	24.15
2	200	159.1	40.9	25.71
3	200	154.2	45.8	29.70
4	200	157.7	42.3	26.82
5	200	162.4	37.6	23.15
6	200	155.2	44.8	28.87
7	200	156	44	28.21
8	200	158.6	41.4	26.10
Promedio	200	158.0375	41.9625	26.588

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO II: GRANULOMETRÍA

ARCILLA:

CONTENIDO DE AGUA DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	
Recipiente N°	10
Recipiente más muestra húmeda (W1)	284
Recipiente más muestra seca (W2)	276.6
Recipiente (Wt):	84
Masa del agua (Ww=w1-w2)	7.4
Masa de muestra seca (Ws=W2-Wt)	192.6
Contenido de agua (1) $2 = (100 \times Ww / W2 - Wt)$ :	3.84

GRAVAS				ARENAS			
				Material que pasa la malla N° 4			
Malla N°	Peso del suelo húmedo	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa	Malla N°	Peso del suelo húmedo	Porcentaje retenido parcial	Porcentaje que pasa
	gr	%	%		gr	%	%
3"	0	0.0	100.0	N° 10	6.4	3.2	96.8
2"	0	0.00	100.0	N° 20	10.8	5.4	91.4
1 1/2"	0	0.0	100.0	N° 40	18.8	9.4	82.0
1"	0	0.0	100.0	N° 60	21	10.5	71.5
3/4"	0	0.0	100.0	N° 100	14.4	7.2	64.3
1/2"	0	0.0	100.0	N° 200	18	9.0	55.3
3/8"	0	0.0	100.0	Pasa N° 200	110.6	55.3	0.0
N° 4	0	0.0	100.0	SUMA	200.0	100.0	
Pasa N° 4	200	100.0	0.0				
SUMA	200	100					

ARENA:

CONTENIDO DE AGUA DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	
Recipiente N°	10
Recipiente más muestra húmeda (W1)	284
Recipiente más muestra seca (W2)	276.6
Recipiente (Wt):	84
Masa del agua (Ww=w1-w2)	7.4
Masa de muestra seca (Ws=W2-Wt)	192.6
Contenido de agua (1) $2 = (100 \times Ww / W2 - Wt)$ :	3.84

GRAVAS				ARENAS			
				Material que pasa la malla N° 4			
Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa	Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa
	gr	%	%		gr	%	%
3"	0	0.0	100.0	N° 10	14.2	6.3	82.4
2"	0	0.00	100.0	N° 20	18	8.0	74.5
1 1/2"	0	0.0	100.0	N° 40	32	14.2	60.3
1"	0	0.0	100.0	N° 60	27	12.0	48.3
3/4"	95	0.8	99.2	N° 100	15	6.7	41.6
1/2"	140	1.2	98.0	N° 200	19.8	8.8	32.8
3/8"	635	5.4	92.6	Pasa N° 200	74.0	32.8	0.0
N° 4	450	3.8	88.7	SUMA	200.0	88.7	
Pasa N° 4	10410	88.7	0.0				
SUMA	11730	100					

MX-TT:

CONTENIDO DE AGUA DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	
Recipiente N°	10
Recipiente más muestra húmeda (W1)	284
Recipiente más muestra seca (W2)	276.6
Recipiente (Wt):	84
Masa del agua (Ww=w1-w2)	7.4
Masa de muestra seca (Ws=W2-Wt)	192.6
Contenido de agua (1) $2 = (100 \times Ww / W2 - Wt)$ :	3.84

GRAVAS				ARENAS			
				Material que pasa la malla N° 4			
Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa	Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa
	gr	%	%		gr	%	%
3"	0	0.0	100.0	N° 10	6.8	3.4	96.6
2"	0	0.00	100.0	N° 20	17.6	8.8	87.8
1 1/2"	0	0.0	100.0	N° 40	29.8	14.9	72.9
1"	0	0.0	100.0	N° 60	18	9.0	63.9
3/4"	0	0.0	100.0	N° 100	21.8	10.9	53.0
1/2"	0	0.0	100.0	N° 200	18.8	9.4	43.6
3/8"	0	0.0	100.0	Pasa N° 200	87.2	43.6	0.0
N° 4	0	0.0	100.0	SUMA	200.0	100.0	
Pasa N° 4	200	100.0	0.0				
SUMA	200	100					

MX-TC2:

CONTENIDO DE AGUA DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	
Recipiente N°	10
Recipiente más muestra húmeda (W1)	284

Recipiente más muestra seca (W2)	276.6
Recipiente (Wt):	84
Masa del agua (Ww=w1-w2)	7.4
Masa de muestra seca (Ws=W2-Wt)	192.6
Contenido de agua (1) 2= (100xWw/W2-Wt):	3.84

GRAVAS				ARENAS			
				Material que pasa la malla N° 4			
Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa	Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa
	gr	%	%		gr	%	%
3"	0	0.0	100.0	N° 10	8.8	4.4	95.6
2"	0	0.00	100.0	N° 20	19.8	9.9	85.7
1 1/2"	0	0.0	100.0	N° 40	28	14.0	71.7
1"	0	0.0	100.0	N° 60	16.6	8.3	63.4
3/4"	0	0.0	100.0	N° 100	20.2	10.1	53.3
1/2"	0	0.0	100.0	N° 200	17.6	8.8	44.5
3/8"	0	0.0	100.0	Pasa N° 200	89.0	44.5	0.0
N° 4	0	0.0	100.0	SUMA	200.0	100.0	
Pasa N° 4	200	100.0	0.0				
SUMA	200	100					

MX-TC6:

CONTENIDO DE AGUA DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	
Recipiente N°	10
Recipiente más muestra húmeda (W1)	284
Recipiente más muestra seca (W2)	276.6
Recipiente (Wt):	84
Masa del agua (Ww=w1-w2)	7.4
Masa de muestra seca (Ws=W2-Wt)	192.6
Contenido de agua (1) 2= (100xWw/W2-Wt):	3.84

GRAVAS				ARENAS			
				Material que pasa la malla N° 4			
Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa	Malla N°	Peso del suelo humedo	Por ciento retenido parcial	Por ciento que pasa
	gr	%	%		gr	%	%
3"	0	0.0	100.0	N° 10	6.8	3.4	96.6
2"	0	0.00	100.0	N° 20	19	9.5	87.1
1 1/2"	0	0.0	100.0	N° 40	28	14.0	73.1
1"	0	0.0	100.0	N° 60	16.2	8.1	65.0
3/4"	0	0.0	100.0	N° 100	20.4	10.2	54.8
1/2"	0	0.0	100.0	N° 200	17.6	8.8	46.0
3/8"	0	0.0	100.0	Pasa N° 200	92.0	46.0	0.0
N° 4	0	0.0	100.0	SUMA	200.0	100.0	
Pasa N° 4	200	100.0	0.0				
SUMA	200	100					

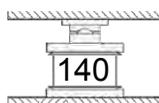
PVSL=	1.56	gr/cm3		
W optimo=	19	%		
Vol. Molde=	930.733	cm3		
Peso Húmedo=	200.000	gr		
Peso Seco=	195.000	gr		
% Humedad actual=	2.564	%		
Mat. Requerido=	1727.813	gr	≈	1730.000 gr
Agua Requerida=	276.882	ml	≈	275.000 ml

### ANEXO III: LÍMITES DE PLASTICIDAD

**Tabla 54.** Factores de plasticidad de la arcilla.

LÍMITE PLÁSTICO										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	%
1	7	-----	-----	-----	27.6	26.2	1.4	19.8	6.4	21.88
HUMEDAD NATURAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	%
CONTRACCIÓN LINEAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	LONGITUD INICIAL			LONGITUD FINAL			CONTRACCIÓN LINEAL		
-----	-----	cm			cm			%		
1	58	10.03			9.41			6.181		
CONTRACCIÓN VOLUMETRICA										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	VOLUMENES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
		Vi	Vf	CV						
-----	-----	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	5	9.01	7.20	18.95	41.4	37.2	4.2	24.6	12.6	33.33

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 55.** Factores de plasticidad de la arena.

LÍMITE PLÁSTICO										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
0	7	-----	-----	-----	0	26.2	-26.2	0	26.2	-100.00
HUMEDAD NATURAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
CONTRACCIÓN LINEAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	LONGITUD INICIAL			LONGITUD FINAL			CONTRACCIÓN LINEAL		
-----	-----	cm			cm			%		
1	34	10.03			10.02			0.100		
CONTRACCIÓN VOLUMETRICA										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	VOLUMENES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	Vi	Vf	CV	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	5	9.01	0.00	-60.79	38.5	38	0.5	24	14	3.57

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 56.** Factores de plasticidad de la muestra MX-TT.

LÍMITE PLÁSTICO										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
2	46	-----	-----	-----	18	16.4	1.6	8.2	8.2	19.51
HUMEDAD NATURAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
CONTRACCIÓN LINEAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	LONGITUD INICIAL			LONGITUD FINAL			CONTRACCIÓN LINEAL		
-----	-----	cm			cm			%		
2	10	10.12			9.77			3.458		
CONTRACCIÓN VOLUMETRICA										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	VOLUMENES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	Vi	Vf	CV	-----	gr	gr	gr	gr	%
2	14	7.60	6.24	7.11	37	34.8	2.2	23	11.8	18.64

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 57.** Factores de plasticidad de la muestra MX-TB.

LÍMITE PLÁSTICO										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	46	-----	-----	-----	17.99	16.39	1.6	8.17	8.22	19.46
HUMEDAD NATURAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
CONTRACCIÓN LINEAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	LONGITUD INICIAL			LONGITUD FINAL			CONTRACCIÓN LINEAL		
-----	-----	cm			cm			%		
1	10	9.99			9.371			6.168		
CONTRACCIÓN VOLUMETRICA										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	VOLUMENES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
		Vi	Vf	CV						
-----	-----	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	2	9.80	9.90	18.95	42.2	38.8	2.95	24	16.1	18.32

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 58.** Factores de plasticidad de la muestra MX-TC6.

LÍMITE PLÁSTICO										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	46	-----	-----	-----	18	16.4	1.6	8.2	8.2	19.51
HUMEDAD NATURAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	N° DE GOLPES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	gr	gr	gr	gr	%
CONTRACCIÓN LINEAL										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	LONGITUD INICIAL			LONGITUD FINAL			CONTRACCIÓN LINEAL		
-----	-----	cm			cm			%		
1	40	9.95			9.66			2.915		
CONTRACCIÓN VOLUMETRICA										
PRUEBA N°	CAPSULA N°	VOLUMENES			PESO DE LA CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (W)
		Vi	Vf	CV						
-----	-----	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	Cm <sup>3</sup>	-----	gr	gr	gr	gr	%
1	2	9.80	8.32	12.96	42.2	38.8	3.4	24	14.8	22.97

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO IV: PRUEBA PROCTOR

**Tabla 59.** Pruebas para distintos volúmenes de arcilla.

	150 ml	250 ml	300 ml	400 ml	470 ml	
PRUEBA N°	1	2	3	4	6	
Peso del molde + suelo húmedo (gr)	3435	3570	3645	3765	3680	
Peso del molde (gr)	1965	1965	1965	1965	1965	
Peso del suelo húmedo (gr)	1470	1605	1680	1800	1715	
Peso específico húmedo (T/m <sup>3</sup> )	1.579	1.724	1.805	1.934	1.843	
Cápsula N°	3	11	10	2	1	
Peso de la cápsula + suelo húmedo (gr)	377	354.8	326.4	315.2	269.2	
Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	353	324.6	291.2	273.6	225	
Peso del agua (gr)	24	30.2	35.2	41.6	44.2	
Peso de la cápsula (gr)	105.8	104.8	98.4	93.6	63.2	
Peso suelo seco (gr)	247.2	219.8	192.8	180	161.8	
Contenido de agua (%)	9.71	13.74	18.26	23.11	27.32	
Peso específico seco (T/m <sup>3</sup> )(g/cm <sup>3</sup> )	1.440	1.516	1.526	1.571	1.447	
Relacion de vacios: e	2.170	1.996	1.831	1.681	1.570	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 60.** Pruebas para distintos volúmenes de arena.

PRUEBA N°	1/150ml	2/200ml	3/250ml	4/300ml	5/370ml
Peso del molde + suelo húmedo (gr)	3395	3510	3605	3790	3710
Peso del molde (gr)	1960	1960	1960	1960	1960
Peso del suelo húmedo (gr)	1435	1550	1645	1830	1750
Peso específico húmedo (T/m <sup>3</sup> )	1.537	1.660	1.762	1.960	1.874
Cápsula N°	10	8	12	15	6
Peso de la cápsula + suelo húmedo (gr)	310.6	302.2	310	303.2	303
Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	297	283	283	270	258

Peso del agua (gr)	13.6	19.2	27	33.2	45
Peso de la cápsula (gr)	90.6	102.4	93.2	94.2	91.8
Peso suelo seco (gr)	206.4	180.6	189.8	175.8	166.2
Contenido de agua (%)	6.59	10.63	14.23	18.89	27.08
Peso específico seco (T/m3)(g/cm3)	1.442	1.500	1.542	1.649	1.475
Relación de vacíos: e	2.328	2.128	1.977	1.810	1.576

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 61.** Pruebas para distintos volúmenes de MX-TT.

PRUEBA N°	1/150ml	2/200ml	3/250ml	4/300ml	5/370ml	6/450ml
Peso del molde + suelo húmedo (gr)	3520	3570	3650	3720	3780	3730
Peso del molde (gr)	1965	1965	1965	1965	1965	1965
Peso del suelo húmedo (gr)	1555	1605	1685	1755	1815	1765
Peso específico húmedo (T/m3)	1.671	1.724	1.810	1.886	1.950	1.896
Cápsula N°	10	8	12	15	6	6
Peso de la cápsula + suelo húmedo (gr)	354.4	397.2	387.6	356.4	464.8	491.4
Peso de la cápsula + suelo seco (gr)	340	375.4	359.6	321.4	399.2	414
Peso del agua (gr)	14.4	21.8	28	35	65.6	77.4
Peso de la cápsula (gr)	146	148.8	144.8	92.4	80.2	80.2
Peso suelo seco (gr)	194	226.6	214.8	229	319	333.8
Contenido de agua (%)	7.42	9.62	13.04	15.28	20.56	23.19
Peso específico seco (T/m3)(g/cm3)	1.555	1.573	1.602	1.636	1.617	1.539
Relación de vacíos: e	2.116	2.022	1.891	1.814	1.655	1.587

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO V: COMPRESIÓN SIMPLE

**Tabla 62.** Registro de deformación de la muestra MX-TT-1.

1	2	3	4	5	6	7	8	Contenido de agua	
Lectura del micrómetro de deformación	Lectura micrómetro de carga	Carga	Deformación total	Deformación unitaria	1- Deformación unitaria	Área corregida	Esfuerzo		
mm.	mm.	Kg.	mm.	-----	-----	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>		
0	0	0.000	0.0000	0.0000	1.0000	9.6120	0.0000	Cápsula N°	B
5	1	0.600	0.1270	0.0015	0.9985	9.6260	0.0623	Peso Cáp. + s.h.	245
10	2	1.200	0.2540	0.0029	0.9971	9.6400	0.1245	Peso Cáp. + s.s.	214.5
15	3.5	2.100	0.3810	0.0044	0.9956	9.6541	0.2175	Peso agua	30.5
20	5	3.000	0.5080	0.0058	0.9942	9.6682	0.3103	Peso Cápsula	94.2
25	6.5	3.900	0.6350	0.0073	0.9927	9.6823	0.4028	Peso suelo seco	120.3
30	7.8	4.680	0.7620	0.0087	0.9913	9.6965	0.4826	W %	25.35
35	9.5	5.700	0.8890	0.0102	0.9898	9.7107	0.5870		
40	11	6.600	1.0160	0.0116	0.9884	9.7250	0.6787		
45	12	7.200	1.1430	0.0131	0.9869	9.7393	0.7393		
50	13	7.800	1.2700	0.0145	0.9855	9.7537	0.7997		
55	13.5	8.100	1.3970	0.0160	0.9840	9.7681	0.8292		
60	14	8.400	1.5240	0.0174	0.9826	9.7825	0.8587		
65	13	7.800	1.6510	0.0189	0.9811	9.7970	0.7962		
70	12	7.200	1.7780	0.0203	0.9797	9.8115	0.7338		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 63.** Registro de deformación de la muestra MX-TT-2.

1	2	3	4	5	6	7	8	Contenido de agua	
Lectura del micrómetro de deformación	Lectura micrómetro de carga	Carga	Deformación total	Deformación unitaria	1- Deformación unitaria	Área corregida	Esfuerzo		
mm.	mm.	Kg.	mm.	-----	-----	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>		
0	0	0.000	0.0000	0.0000	1.0000	9.5480	0.0000	Cápsula N°	1
5	2	1.200	0.1270	0.0015	0.9985	9.5620	0.1255	Peso Cáp. + s.h.	261.8
10	4	2.400	0.2540	0.0029	0.9971	9.5759	0.2506	Peso Cáp. + s.s.	244
15	5.5	3.300	0.3810	0.0044	0.9956	9.5900	0.3441	Peso agua	17.8
20	7	4.200	0.5080	0.0058	0.9942	9.6040	0.4373	Peso Cápsula	104.6
25	9	5.400	0.6350	0.0073	0.9927	9.6181	0.5614	Peso suelo seco	139.4
30	11	6.600	0.7620	0.0088	0.9912	9.6323	0.6852	W %	12.77
35	12	7.200	0.8890	0.0102	0.9898	9.6465	0.7464		
40	13	7.800	1.0160	0.0117	0.9883	9.6607	0.8074		
45	13.5	8.100	1.1430	0.0131	0.9869	9.6750	0.8372		
50	13.5	8.100	1.2700	0.0146	0.9854	9.6893	0.8360		
55	13	7.800	1.3970	0.0160	0.9840	9.7037	0.8038		
60	11	6.600	1.5240	0.0175	0.9825	9.7181	0.6791		
65	10.5	6.300	1.6510	0.0190	0.9810	9.7325	0.6473		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 64.** Registro de deformación de la muestra MX-TT-3.

1	2	3	4	5	6	7	8	Contenido de agua	
Lectura del micrómetro de deformación	Lectura micrómetro de carga	Carga	Deformación total	Deformación unitaria	1- Deformación unitaria	Área corregida	Esfuerzo		
mm.	mm.	Kg.	mm.	-----	-----	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>		
0	0	0.000	0.0000	0.0000	1.0000	9.6408	0.0000	Cápsula N°	5
5	2.5	1.500	0.1270	0.0014	0.9986	9.6547	0.1554	Peso Cáp. + s.h.	233.8
10	4.5	2.700	0.2540	0.0029	0.9971	9.6688	0.2792	Peso Cáp. + s.s.	216.8
15	6	3.600	0.3810	0.0043	0.9957	9.6828	0.3718	Peso agua	17
20	7.5	4.500	0.5080	0.0058	0.9942	9.6970	0.4641	Peso Cápsula	80.6
25	9	5.400	0.6350	0.0072	0.9928	9.7111	0.5561	Peso suelo seco	136.2
30	10	6.000	0.7620	0.0087	0.9913	9.7253	0.6169	W %	12.48
35	11.5	6.900	0.8890	0.0101	0.9899	9.7395	0.7085		
40	12.5	7.500	1.0160	0.0116	0.9884	9.7538	0.7689		
45	13	7.800	1.1430	0.0130	0.9870	9.7681	0.7985		
50	13	7.800	1.2700	0.0145	0.9855	9.7825	0.7973		
55	12.5	7.500	1.3970	0.0159	0.9841	9.7969	0.7655		
60	11	6.600	1.5240	0.0174	0.9826	9.8113	0.6727		
65	10	6.000	1.6510	0.0188	0.9812	9.8258	0.6106		

Fuente: Elaboración propia.

#### ANEXO VI: REMOLDEO DE MUESTRAS

##### Remoldeo de Arcilla

###### Volumen del Molde

	Diámetro (cm)	Alturas (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
	10.09	11.63	930.733
	10.09	11.64	
Promedio	10.090	11.64	
	Promedio	11.640	

##### Remoldeo de Arena

PVSL=	1.6	gr/cm <sup>3</sup>		
W optimo=	18	%		
Vol. Molde=	930.733	cm <sup>3</sup>		
Peso Húmedo=	200.000	gr		
Peso Seco=	195.000	gr		
% Humedad actual=	2.564	%		
Mat. Requerido=	1757.224	gr	≈	1755.000 gr
Agua Requerida=	264.462	ml	≈	265.000 ml

###### Volumen del Molde



	Diámetro (cm)	Alturas (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
	10.09	11.63	930.733
	10.09	11.64	
Promedio	10.090	11.64	
	Promedio	11.640	

Remoldeo MX-TT

PVSL=	1.63	gr/cm <sup>3</sup>			
W optimo=	15.5	%			
Vol. Molde=	930.733	cm <sup>3</sup>			
Peso Húmedo=	200.000	gr	Proporciones		
Peso Seco=	195.000	gr	80% arena	1400	gr
			20% arcilla	350	gr
% Humedad actual=	2.564	%			
Mat. Requerido=	1752.245	gr	≈	1750.000	gr
Agua Requerida=	221.002	ml	≈	220.000	ml

Volumen del Molde

	Diámetro (cm)	Alturas (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
	10.09	11.63	930.733
	10.09	11.64	
Promedio	10.090	11.64	
		11.65	
Promedio		11.640	

# ANEXO VII: CALIBRACIÓN DE MATRACES

## CALIBRACIÓN DE MATRACES

Matraz XV										
Temperatura( °C)	20	9	7	15.5	23	20	14.5	21.5	33	18
Peso (grs)	686.8	687.6	687.6	687.2	686.2	686.8	687.2	686	685	686.8

Matraz 10												
Temperatura( °C)	20	6.5	15	14	19	13	27	18	29	23	27.3	31
Peso (grs)	692.4	693.2	693.2	693	692.4	692.8	691.6	692.4	691.4	691.8	691.2	690.8

Matraz 14									
Temperatura( °C)	20	6.5	11.5	19	24	29.5	34.5		
Peso (grs)	691	692.2	692	691.6	690.8	690.2	689.4		

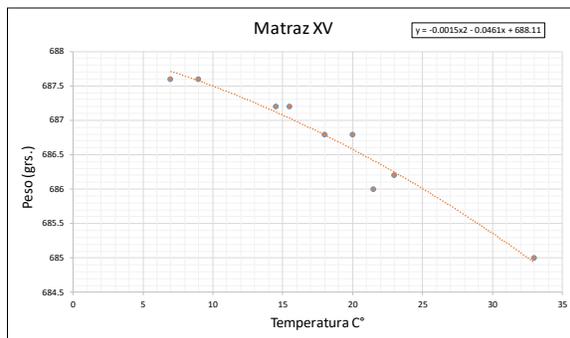
Matraz XVI									
Temperatura( °C)	20	5	12.5	18.5	24	28	32.5		
Peso (grs)	685.8	686.6	686.4	686	685.4	685	684.2		

Matraz	Peso del Ma	Temperatura Inicial
26 XV	189	20°C

685.8

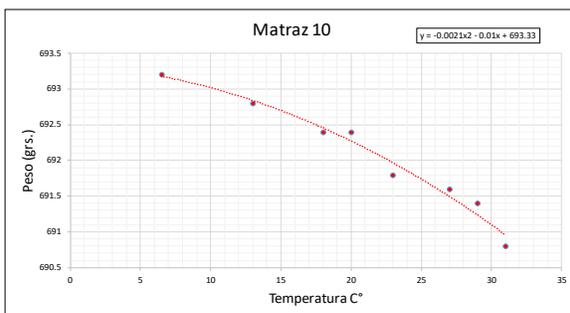
Matraz	Peso del Ma	Temperatura Inicial
XV	189	20°C

Matraz XV									
Temperatura( °C)	7	9	14.5	15.5	18	20	21.5	23	33
Peso (grs)	687.6	687.6	687.2	687.2	686.8	686.8	686	686.2	685



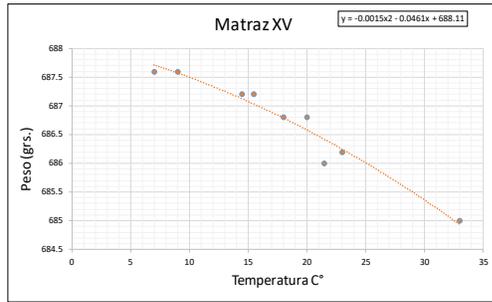
$$\begin{aligned} \text{Matraz XV} &= 27.5 \\ \text{Matraz XV} &= 685.708 \\ -0.0015 &+ 756.25 \\ -0.0461 &+ 27.5 \\ \hline &= 688.11 \end{aligned}$$

Matraz 10								
Temperatura( °C)	6.5	13	18	20	23	27	29	31
Peso (grs)	693.2	692.8	692.4	692.4	691.8	691.6	691.4	690.8



$$\begin{aligned} \text{Matraz 10} &= 30 \\ \text{Matraz 10} &= 691.140 \\ -0.0021 &+ 900 \\ -0.01 &+ 30 \\ \hline &= 693.33 \end{aligned}$$

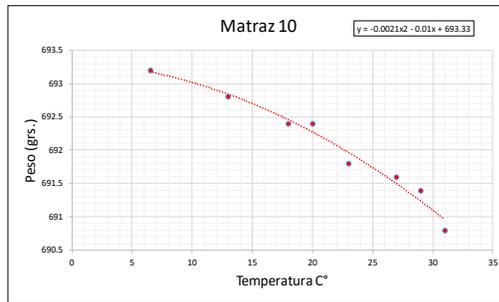
		Matraz XV								
Temperatura (°C)		7	9	14.5	15.5	18	20	21.5	23	33
Peso (grs)		687.6	687.6	687.2	687.2	686.8	686.8	686	686.2	685



Matraz XV  
Temp= 34.5

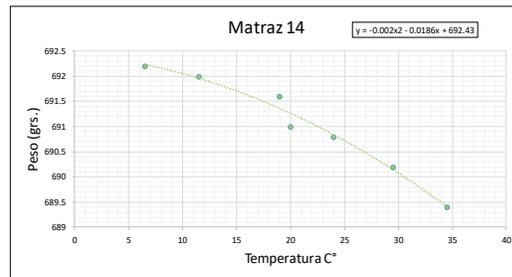
Matraz XV = -0.0015 + 684.734 + 1190.25 + -0.0461 + 34.5 + 688.11

		Matraz 10							
Temperatura (°C)		6.5	13	18	20	23	27	29	31
Peso (grs)		693.2	692.8	692.4	692.4	691.8	691.6	691.4	690.8



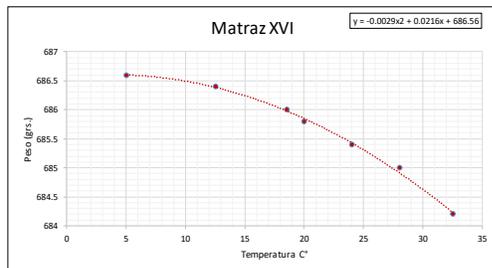
Matraz 10 = -0.0021 + 691.650 + 26 + 693.33

		Matraz 14						
Temperatura (°C)		6.5	11.5	19	20	24	29.5	34.5
Peso (grs)		692.2	692	691.6	691	690.8	690.2	689.4



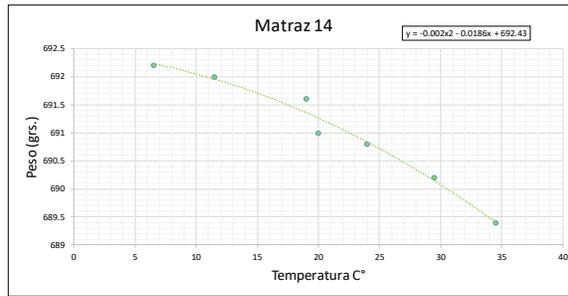
Matraz 14 = -0.002 + 690.739 + 24.8 + 692.43

		Matraz XVI						
Temperatura (°C)		5	12.5	18.5	20	24	28	32.5
Peso (grs)		686.6	686.4	686	685.8	685.4	685	684.2



Matraz XVI = -0.0029 + 684.029 + 1122.25 + 0.0216 + 33.5 + 686.56

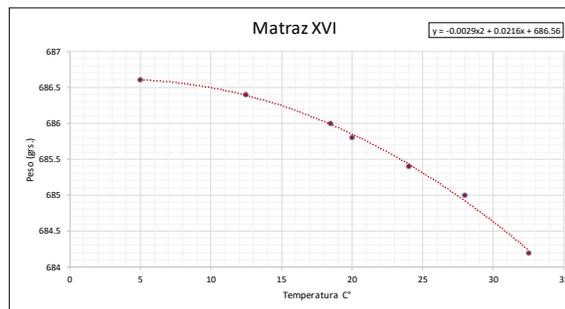
Matraz 14							
Temperatura (°C)	6.5	11.5	19	20	24	29.5	34.5
Peso (grs)	692.2	692	691.6	691	690.8	690.2	689.4



Matraz 14  
Temp= 25.5

Matraz 14  
Matraz 14  
= 690.655  
-0.002  
+ 650.25  
+ -0.0186  
+ 25.5  
+ 692.43

Matraz XVI							
Temperatura (°C)	5	12.5	18.5	20	24	28	32.5
Peso (grs)	686.6	686.4	686	685.8	685.4	685	684.2

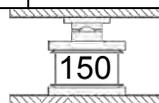


Matraz XVI  
Temp= 33.5

Matraz XVI  
Matraz XVI  
= 684.029  
-0.0029  
+ 1122.25  
+ 0.0216  
+ 33.5  
+ 686.56

## ANEXO VIII: ESFUERZO A COMPRESIÓN DE MUESTRAS

Muestra	Peso (gr)	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza (kgf)	Resistencia (Mpa)	Tipo de falla
MX-TC2-1	2400.7	139.2	2119.4	1.493	falla horizontal
MX-TC2-2	2429.43	146.4	1711.8	1.147	falla diagonal
MX-TC2-3	2417.21	144	1886.7	1.285	falla diagonal
MX-TC2-4	2431.3	145.2	2905.5	1.962	falla horizontal
MX-TC2-5	2402.2	142.8	1441	0.990	falla vertical
MX-TT-1	2340.37	141.6	1301.7	0.902	falla interna
MX-TT-2	2359.81	145.2	1543	1.042	falla diagonal
MX-TT-3	2354.5	140.4	1274.2	0.890	falla horizontal
MX-TT-4	2354.89	135.6	1546	1.118	falla diagonal
MX-TT-5	2352.5	145.2	1508.4	1.019	falla por esquinas
MX-TB-1	2242.51	147.6	1413	0.939	falla diagonal
MX-TB-2	2243.77	142.8	1601.8	1.100	falla diagonal
MX-TB-3	2243.21	139.2	1541.3	1.086	fractura interna
MX-TB-4	2249.56	141.6	1592.2	1.103	falla vertical
MX-TB-5	2250.02	142.8	1521.6	1.045	falla horizontal



MX-TC6-1	2368.07	141.6	1929.1	1.336	falla diagonal
MX-TC6-2	2367.91	141.6	1649.5	1.142	fractura interna
MX-TC6-3	2365.5	144	1636.6	1.115	falla diagonal
MX-TC6-4	2356.8	145.2	1716.3	1.159	falla vertical
MX-TC6-5	2360.6	140.4	1705.5	1.191	falla diagonal
MX-TP-1	2380.92	138	1699.4	1.208	falla diagonal
MX-TP-2	2392.6	146.4	1600	1.072	falla vertical
MX-TP-3	2398.5	140.4	1755.5	1.226	falla por esquinas
MX-TP-4	2377.7	142.8	1603	1.101	falla diagonal
MX-TP-5	2366.9	144	1656.9	1.128	falla por eaquinas

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO IX: ESFUERZO A COMPRESIÓN DE MUESTRAS

**Tabla 65.** Resultados de resistividad.

Muestra	Lado (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega$ /cm <sup>2</sup> )
MX-TT-1	11.6	139.2	9200	110.4
MX-TT-2	12.2	146.4	10200	122.4
MX-TT-3	12	144	11000	132
MX-TT-4	12.1	145.2	9000	108
MX-TT-5	11.9	142.8	14000	168
MX-TP-1	11.8	141.6	40000	480
MX-TP-2	12.1	145.2	43000	516
MX-TP-3	11.7	140.4	34000	408
MX-TP-4	11.3	135.6	29000	348
MX-TP-5	12.1	145.2	31000	372
MX-TB-1	12.3	147.6	10500	126
MX-TB-2	11.9	142.8	25000	300
MX-TB-3	11.6	139.2	33000	396
MX-TB-4	11.8	141.6	27000	324
MX-TB-5	11.9	142.8	32000	384
MX-TC2-1	11.8	141.6	12400	148.8
MX-TC2-2	11.8	141.6	18000	216
MX-TC2-3	12	144	21000	252
MX-TC2-4	12.1	145.2	17000	204
MX-TC2-5	11.7	140.4	15000	180
MX-TC6-1	11.5	138	9000	108

MX-TC6-2	12.2	146.4	11600	139.2
MX-TC6-3	11.7	140.4	16000	192
MX-TC6-4	11.9	142.8	15500	186
MX-TC6-5	12	144	9200	110.4

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO X: CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

**Tabla 66.** Resultados de absorción.

Muestra	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Humedad (%)
MX-TT-1	222.14	243.2	9.481
MX-TT-2	223.59	244.26	9.245
MX-TT-3	224.77	244.78	8.902
MX-TT-4	222.14	244.24	9.949
MX-TT-5	221.77	242.29	9.253
MX-TP-1	212.11	239.51	12.918
MX-TP-2	213.42	239.55	12.243
MX-TP-3	212.72	239.67	12.669
MX-TP-4	212.88	239.71	12.603
MX-TP-5	212.95	239.48	12.458
MX-TB-1	212.14	241.21	13.703
MX-TB-2	210.99	238.99	13.271
MX-TB-3	210.42	240.52	14.305
MX-TB-4	210.67	239.68	13.770
MX-TB-5	213.44	242.25	13.498
MX-TC2-1	213.94	240.08	12.218
MX-TC2-2	214.81	239.57	11.526
MX-TC2-3	213.96	239.92	12.133
MX-TC2-4	214.94	240.13	11.720
MX-TC2-5	213.95	240.04	12.194
MX-TC6-1	214.31	236.02	10.130
MX-TC6-2	214.44	234.97	9.574
MX-TC6-3	214.56	235.92	9.955
MX-TC6-4	212.1	233.88	10.269
MX-TC6-5	214.31	235.96	10.102

Fuente: Elaboración propia.