



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA
SUR-PONIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA,
PUEBLA, MÉXICO.**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN GEOTECNIA**

Presenta:

JULIO MISRAIM CABRERA SURIANO

Asesor de tesis:

M. I. Miguel Ángel Figueras Corte

Coasesor de tesis:

M. I. Araceli Aguilar Mora

Puebla, Pue.

Noviembre 2016



BUAP

OFICIO SIEP No. 2821/ 2016

ING. JULIO MISRAIM CABRERA SURIANO

Maestría en Ingeniería, Opción terminal Geotecnia
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de cambio de tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado **“ZONIFICACION GEOTÉCNICA DEL ÁREA SUR-PONIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA, PUEBLA, MÉXICO”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia. Asignándose como Asesor de Tesis al M.I. Miguel Ángel Figueras Corte y Co-Asesor a la M.I. Araceli Aguilar Mora.

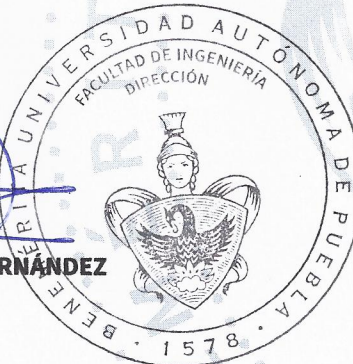
Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Pue., a 27 de octubre de 2016

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. M.I. Miguel Ángel Figueras Corte.-Asesor tema de tesis.

C.c.p. M.I. Araceli Aguilar Mora. Co-Asesor tema de tesis.

C.c.p. Archivo

ABH/AAM/dsm.

60
AÑOS DE
AUTONOMÍA
UNIVERSITARIA

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández.
Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP
PRESENTE

En atención a la atenta solicitud de nombrar al que suscribe como asesor de la tesis: **“Zonificación geotécnica del área sur-poniente de la ciudad de Puebla, Puebla, México”**, mediante el oficio No. 2821/2016 que presenta el alumno de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en geotecnia, **Ing. Julio Misraim Cabrera Suriano**; me permito informar a usted que después de haber revisado el documento correspondiente, no existe inconveniente alguno en **autorizar la impresión** de la misma.

Lo hago de su conocimiento, para los efectos académicos a que haya lugar.

ATENTAMENTE

H. Puebla de Z., a 4 de noviembre de 2016


M. I. Miguel Angel Figueras Corte
Asesor de Tesis

C. c. p. Mesa de exámenes profesionales

C. c. p. Interesado

C. c. p. Archivo

DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo a mis padres: Gregorio Cabrera Guerrero y Teresita de Jesús Suriano Avendaño, por el apoyo y amor que en todo momento me han brindado, siempre creyendo en mi capacidad, motivándome a seguir adelante en mi crecimiento profesional.

A mis hermanas: Viry, Aury, Moni y Brenda, que siempre han contribuido con amor en el cumplimiento de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor M. I. Miguel Ángel Figueras Corte y a mi co-asesora M. I. Araceli Aguilar Mora la paciencia que tuvieron y la estima que me demostraron durante la realización del presente trabajo.

A la empresa Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD) por la información proporcionada, en especial al Ing. Azomoza.

A los compañeros: Susana Arely Rendón Pérez y Manuel de Jesús Gómez Pasquett, por el apoyo en la recopilación de estudios.

“ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA SUR – PONIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA, PUEBLA, MÉXICO”.

Investigar y clasificar las características geotécnicas del subsuelo; es de suma importancia para la ingeniería de cimentaciones, pues el conocer las propiedades índice y mecánicas más importantes de la ciudad de Puebla, aportará información valiosa para las vías terrestres, geotecnia y áreas afines, por lo cual, surge el interés de contribuir a la actualización de la zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla propuesta por Azomoza, et al, 1998; con base en aproximadamente 400 estudios de mecánica de suelos distribuidos en la ciudad, que en ese entonces sirvieron para clasificar y definir diferentes zonas según el tipo de suelo existente; dicha propuesta es de gran utilidad principalmente como referencia para proponer una adecuada exploración geotécnica y definir el tipo de muestreo a realizar según la ubicación del sitio de interés, cabe mencionar que en el transcurso de los años ha aumentado el número de estudios realizados, el cual obedece al crecimiento de la mancha urbana, contribuyendo con información valiosa para realizar nuevas caracterizaciones con mayor exactitud, acrecentando el beneficio del conocimiento para los ingenieros y favoreciendo los proyectos de futuras construcciones en la zona, por lo cual se espera que esta investigación motive y despierte el interés de colegas geotecnistas para colaborar en las revisiones de las zonificaciones existentes en la república mexicana, hasta lograr una concepción general del tipo de suelo y propiedades existentes en todo nuestro país; labor ardua, pero sin duda benéfica para esta rama de la ingeniería.

ÍNDICE	<i>Página</i>
Introducción	III
Problema de investigación	V
Objetivos general y específicos	VI
Justificación	VII
CAPITULO I. Antecedentes	1
CAPITULO II. Características de la zona de estudio	7
II.1 Localización	7
II.2 Orografía	7
II.3 Hidrografía	8
II.4 Geología	9
II.5 Sismicidad	10
II.6 Población y urbanización	11
II.7 Crecimiento demográfico	13
II.8 Crecimiento urbano	13
II.9 Fraccionamientos	14
II.10 Juntas auxiliares	15
CAPITULO III. Caracterización geotécnica y propiedades del suelo	17
III.1 Trabajos realizados	17
III.2 Tipo de sondeos y muestreo	18
III.3 Pruebas de laboratorio	18
III.4 Análisis de la información	19
CAPITULO IV. Zonificación geotécnica de la área sur-poniente de la ciudad de Puebla	23
CONCLUSIÓN	25
REFERENCIAS	26
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

En el año de 1976, Auvinet presentó en la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos efectuada en la Cd. de Guanajuato, Gto., la primera propuesta de zonificación para la ciudad de Puebla; sin embargo a pesar de ser una gran aportación, fue muy generalizada debido a la cantidad de estudios utilizados, sin mencionar que la mancha urbana aumentó considerablemente, sobrepasando el área de zonificación.

Dando continuidad a esta línea de trabajo, en el año de 1998 Azomoza planteó la zonificación geotécnica del área urbana del valle de Puebla, misma que presentó en la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos; no obstante de ser una valiosa fuente de información debido a los aproximadamente 400 estudios que fueron seleccionados para llevar a cabo dicha propuesta, ya han pasado 18 años, durante los cuales la mancha urbana ha sobrepasado el área de esta zonificación, principalmente extendiéndose hacia la zona sur de la ciudad.

Derivado de las dos propuestas antes mencionadas y con la intención de actualizar la zonificación existente, y contribuir con información de acuerdo al crecimiento de la mancha urbana hacia al sur de la ciudad, se realiza el presente trabajo, el cual está enfocado a la caracterización del subsuelo de la zona sur - poniente de la ciudad de Puebla, considerando un área en forma de “abanico” que comprende desde la Av. 11 sur hasta la federal Atlixco; para lo cual se realizó una recopilación de estudios llevados a cabo por la empresa Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD), especializada en estudios de mecánica de suelos; los resultados de éstos se analizaron, estudiaron e interpretaron, primero ubicándolos para conocer la cantidad de información disponible en la zona de crecimiento urbano y delimitar el área de interés, posteriormente con ayuda de los perfiles estratigráficos y resultados de las pruebas de laboratorio se determinó el material predominante en cada sondeo de acuerdo a sus propiedades índice y clasificación SUCS, una vez realizado lo anterior se procedió a mapear la información considerando un área representativa de influencia respecto al suelo encontrado en cada sondeo; para finalizar se efectuaron distintos cortes estratigráficos para visualizar la distribución aproximada de los materiales presentes en el subsuelo. Con base a esta

información, que incluye las propiedades índice y clasificación SUCS de los estudios analizados, se propone la zonificación geotécnica del área sur-poniente de la ciudad de Puebla, aportando información que ampliará la zonificación efectuada en el año de 1998, la cual no contemplaba la zona en comento ya que en ese entonces el crecimiento urbano no se extendía a dicha área.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Debido al aumento de la población en el valle de Puebla y al crecimiento urbano que esto genera, se hace necesario para la rama de la construcción, principalmente para la ingeniería geotécnica, contar con información confiable que permita conocer de manera rápida y orientativa la clasificación y tipos de suelos predominantes en el área de mayor crecimiento urbano en los últimos años, pues la última zonificación geotécnica fue realizada en el año de 1998 y a la fecha no existe una actualización de la misma; cabe mencionar que el incremento de asentamientos humanos ha tenido lugar principalmente en el sur del área urbana del valle de Puebla, aunado a lo anterior y conociendo la importancia de una actualización en la zonificación existente, se pretende realizar mediante una recopilación de estudios de mecánica de suelos de los últimos 18 años, principalmente sondeos de penetración estándar (SPT) para llevar a cabo la caracterización geotécnica de la zona sur-poniente, y por ende, contribuir a la actualización de la existente para contar con información actual y fidedigna del tipo de suelo presente en la ciudad de Puebla.

Es importante mencionar que una zonificación geotécnica no debe sustituir en ningún momento un estudio de mecánica de suelos, el cual es indispensable para un diseño geotécnico adecuado; pero si será útil, ya que indudablemente la información que proporcionará la zonificación permitirá conocer previamente y de manera orientativa el tipo de suelo existente.

OBJETIVO GENERAL

Realizar la zonificación geotécnica del área sur – poniente de la ciudad de Puebla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reunir la mayor cantidad de estudios de mecánica de suelos realizados en la zona de estudio de 1998 a la fecha.
- Analizar la información de los estudios efectuados en la zona sur – poniente del área urbana de Puebla.
- Elaborar e interpretar perfiles estratigráficos, además de identificar las propiedades índice para su correlación en la zona de interés, y con ello, orientar de mejor forma la ingeniería de cimentaciones y materias afines.
- Incorporar la caracterización del área de estudio a la zonificación existente.
- Representar gráficamente en una superficie bidimensional los resultados de la ampliación y actualización de la zonificación existente.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente no se cuenta con información preliminar geotécnica suficiente y fidedigna que permita conocer de manera general las propiedades físicas del subsuelo, con la finalidad de establecer criterios rápidos de exploración y muestreo para un proyecto específico en un sitio en particular de la ciudad de Puebla; además de ser utilizada de forma orientativa para el ordenamiento urbano y crecimiento ordenado, ya que conociendo de manera amplia y veraz las propiedades y tipo de suelo existente, se puede favorecer a la planeación de concentración y distribución de la población, según sea el tipo de suelo, mismo que influye en el comportamiento y proyección de las edificaciones y estructuras, pues se contará con información general de las características geotécnicas de la zona de interés; considerando que el urbanismo es un factor importante que condiciona las finanzas, la calidad de vida y además genera la cohesión social y física de la sociedad.

De lo anterior, la actualización de la zonificación geotécnica del valle de Puebla (Azomoza, et al, 1998) debe de ser prioritaria, por lo que surge el interés de particularizar el conocimiento geotécnico en la zona sur – poniente, siendo de gran utilidad, debido a que la concentración de la población y el crecimiento urbano tiende a un desarrollo considerable en dicha área debido a las actuales inversiones y construcciones de edificios, centros comerciales y desarrollos inmobiliarios que se han asentado en dicha zona, por lo cual, al dilucidar de manera gráfica y ordenada la información en comento se contará con una fuente de consulta importante para el diseño geotécnico, proporcionando principalmente la caracterización de la zona antes mencionada.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos:

Capítulo I. Se describen los antecedentes, en particular, las propuestas de zonificación y trabajos existentes a la fecha, lo cual evidencia que la zona en estudio no había sido considerada, pues la ciudad de Puebla no contaba con el crecimiento urbano actual.

Capítulo II. Se describen las características de la zona sur – poniente de la ciudad, tales como: localización, crecimiento demográfico, urbanización, hidrología, entre otras; se establece un marco teórico, para así interpretar adecuadamente el contenido del Capítulo III.

Capítulo III. Se analiza la información geotécnica recopilada de los estudios de la zona sur – poniente, así mismo se describen las propiedades índice, y con base en éstas se realiza la caracterización; mencionando el tipo de muestreo y los resultados del mismo.

Capítulo IV. Se presenta la caracterización geotécnica de la zona sur - poniente de la ciudad de Puebla, incorporando la información obtenida en el presente trabajo al mapa de caracterización existente efectuado en el año de 1998, teniendo como resultado una actualización y ampliación del mismo.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Ubicación de las formaciones volcánicas que rodean al valle de Puebla.
Fuente: Google Earth.
- Figura 2.** Carta de zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla, Azomoza, et al, 1998.
- Figura 3.** Fallas geológicas en el área urbana (INEGI, 2015).
- Figura 4.** Superficie de Puebla. Fuente: Google Maps.
- Figura 5.** Delimitación del municipio de Puebla. Fuente Google Maps, INEGI 2016.
- Figura 6.** Orografía del Estado de Puebla (INEGI, 2015).
- Figura 7.** Hidrografía del estado de Puebla. (INEGI – CONAGUA, 2007).
- Figura 8.** Geología del estado de Puebla (INEGI, 2015).
- Figura 9.** Fallas geológicas regionales (Azomoza, et al, 1998).
- Figura 10.** Propuesta de zonificación sísmica (Ruíz, 1993).
- Figura 11.** Microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla (Modificado de Chávez-García, et al., 1995).
- Figura 12.** Límites territoriales entre Puebla y San Andrés Cholula (Congreso del Estado, 2013)
- Figura 13.** Población total en el municipio de Puebla 1998 – 2015, (INEGI, 2015).
- Figura 14.** Número de viviendas en el municipio de Puebla de 1998 a 2010 (INEGI, 2015).
- Figura 15.** Tendencia de expansión y asentamiento urbano en el municipio de Puebla.
Fuente: elaboración propia con información del Plan de desarrollo municipal, 2014-2018.
- Figura 16.** Juntas auxiliares (INEGI, 2010).
- Figura 17.** Ubicación de los estudios realizados por la empresa ICD en el valle de la Ciudad de Puebla. Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).
- Figura 18.** Fronteras de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).
- Figura 19.** Área de estudio (48.28 km²). Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).

Figura 20. Curvas de nivel del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 21. Curvas de nivel de las arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 22. Representación por medio de vectores de las curvas de nivel del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 23. Representación por medio de vectores de las curvas de nivel de arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 24. Representación en 3D del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 25. Representación del estrato de arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

Figura 26. Cortes estratigráficos. Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).

Figura 27. Cortes estratigráficos 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Cortes estratigráficos 3 y 4. Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Cortes estratigráficos 5 y 6. Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Cortes estratigráficos 7 y 8. Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad de Puebla, representado en la aplicación Google Earth.

Figura 32. Propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad de Puebla.

Figura 33. Zonificación geotécnica del área sur – poniente de la ciudad de Puebla.

Figura 34. Carta de zonificación geotécnica para el área urbana del Valle de Puebla. 2016.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Correlación cohesión –tipo de suelo – coeficiente sísmico. Fuente: Reglamento de construcción de la ciudad de Puebla.

Tabla 2. Tipos y número de viviendas habitadas en el municipio de Puebla al año 2010, (INEGI, 2015).

Tabla 3. Crecimiento urbano del municipio de Puebla (Plan de desarrollo municipal, 2014-2018).

Tabla 4. Relación de estudios y resumen de propiedades índice. Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

Debido al crecimiento de población en la ciudad de Puebla, ha sido necesaria la caracterización geotécnica del suelo, para esto, han existido pioneros en estos estudios realizados para la zona urbana; la primera zonificación de la ciudad fue propuesta por Auvinet y fue presentada en la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos en el año de 1976 en la Cd. de Guanajuato Gto. (SMMS, Tomo II, 1976: 183-210), y la segunda por Azomoza y colaboradores, esta última presentada en la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos en el año de 1998 en la ciudad de Puebla, Pue., sustentada en aproximadamente 400 estudios de mecánica de suelos; desde entonces no se ha presentado una nueva zonificación que actualice el área del valle de Puebla, sin embargo, recopilando y retomando dichas investigaciones se identifican los depósitos que se describen en los siguientes párrafos.

DEPÓSITOS EÓLICOS DE ORIGEN VOLCÁNICO.

La ubicación geográfica del valle de Puebla ha contribuido enormemente a la presencia de los depósitos eólicos de origen volcánico, debido a estar rodeado de las formaciones volcánicas como son: Citlaltépetl, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Malintzin, y Cuexcomate, mismas que se ubican como lo muestra la figura 1; dichos depósitos se manifiestan e incluso conforman la base sobre la que yacen las otras formaciones existentes en la región del valle de Puebla.

De acuerdo a lo antes mencionado es evidente la presencia de tobas arenosas y gravosas, así como también de suelos tobáceos, siendo éstos los últimos productos manifestados por la actividad volcánica regional; a sabiendas que los suelos volcánicos pueden ser producto del residuo por alteración de los materiales subyacentes, resultando depósitos limo – arenosos y arcillas. En las tobas existe generalmente un alto grado de cementación que les da la consistencia de una roca suave, considerando así que son producto de cenizas consolidadas; en los suelos, esta consistencia es variable, dependiendo de su compacidad, cementación y grado de alteración.

En concordancia con lo descrito se puede apreciar en la figura 2 que los suelos tobáceos abundan en la ciudad, con afloramientos importantes en extensión y espesores;

regionalmente, estos materiales son conocidos como “tepetates”. Se clasifican de acuerdo al SUCS, como limos o arcillas arenosas y arenas limosas o arcillosas, de colores café y café claro (amarillento), con contenido natural de agua de 15 a 40%. La fracción fina, limosa o arcillosa, es de baja plasticidad ($LL < 50\%$), con índice plástico (IP) variable entre 15 y 25% y porcentaje de partículas finas variable de 30 a 70% (Azomoza, et al, 1998).

La consistencia de estos suelos varía de media a dura con 15 a más de 50 golpes en la prueba de penetración estándar, su cohesión, medida como un medio de su resistencia a la compresión simple, es del orden de 6 a más de 15 t/m^2 (Azomoza, et al, 1998).

Es por estas propiedades que regularmente se utiliza en la región para la conformación de capas de mejoramiento y rellenos estructurados en distintas áreas de la construcción.

DEPÓSITOS ALUVIO – PALUSTRE – LACUSTRE.

La antigua presencia de lagunas y pantanos en la ciudad produjo la formación de áreas importantes que contienen sedimentos de materiales arcillo – limosos y descomposición de materia vegetal, los cuales, han hecho posible la existencia de mantos de suelos compresibles, clasificados de acuerdo al SUCS como arcillas y limos de media y alta plasticidad, y suelos orgánicos, mismos que se han detectado con espesores considerables de hasta 20 m, caracterizados principalmente por su baja resistencia al esfuerzo cortante y su gran compresibilidad.

Las arcillas y limos inorgánicos reportan contenidos naturales de agua de 60 a 80%; en los suelos orgánicos se determinan valores de 100 a 200% o más. Su resistencia a la penetración estándar es prácticamente nula o de no más de 5 golpes; su cohesión en compresión simple y pruebas triaxiales no drenadas varía de 3 a 6 t/m^2 (Azomoza, et al, 1998).

DEPÓSITOS HIDROTERMALES

La presencia de carbonatos de calcio en aguas sulfurosas templadas origina la formación de la roca travertino, la cual es denominada como una roca sedimentaria, siendo ésta una roca caliza, que al disolverse con agua ha dado paso a la formación de oquedades. La presencia de estas aguas en la ciudad, principalmente en la falla que corre aproximadamente desde Agua Azul a Rancho Colorado y un ex-balneario en la Av. Juárez, entre las calles 15 y 17 sur, la cual orienta la presencia de esta formación rocosa, que se extiende en dirección SE-NW y en gran parte del Centro Histórico, tal y como se observa en la figura 3.

Como se mencionó el travertino es una roca caliza, color café amarillento, con espesores que varían en capas de algunos centímetros hasta más de 10 m. Su índice de calidad varía de 0 a 100%, es decir, se encuentra totalmente fracturada y alterada o masiva, sana y poco porosa, con resistencia a la compresión simple de más de 150 kg/cm² (Azomoza, et al, 1998).

Otra formación relacionada a la formación del travertino son las “tufas calcáreas”, formadas por los escurrimientos de agua cargada de calcio que constituyen estructuras sumamente abiertas o porosas, con pesos volumétricos secos de 0.60 a 0.90 t/m³ y resistencias en compresión simple de 3 a 6 t/m² (Azomoza, et al, 1998).

ARCILLAS EXPANSIVAS

La expansividad en los minerales de arcilla por absorción de agua se debe a los siguientes factores: absorción en superficie de moléculas de agua, hidratación de los cationes de cambio (expansión intracristalina), expansión osmótica, carga interlaminar de las montmorillonitas sódicas y presión en los bordes de las esmectitas magnésicas (González de Vallejo, 2004).

Se ha podido observar en la zonificación existente, que en una gran extensión, principalmente al sur y parte al poniente de la ciudad, ubicado desde la carretera federal a Atlixco hasta la laguna de Valsequillo, limitando desde el bulevar del Niño Poblano y parte del Río San Francisco hacia el sur la formación de suelos tobáceos, se encuentra parcial o totalmente cubierta por una arcilla de alta plasticidad, misma que ha sido

producto residual de la formación volcánica del lugar, susceptible a experimentar cambios volumétricos de expansión y contracción al variar su contenido natural de agua.

La arcilla se distingue por tener una coloración gris oscuro a negro y presentar fuertes agrietamientos, notables a simple vista. Su contenido natural de agua es variable de 15 a 50% y su límite líquido es generalmente superior a 60%. A partir de sus propiedades índice y pruebas mecánicas de laboratorio a propósito, la arcilla se clasifica de mediana expansividad, con presiones de expansión del orden de 3 a 7 t/m² (Azomoza, et al, 1998).

Este tipo de material, a pesar de que al contacto con el agua presenta expansividad y cambios volumétricos, tiene la característica de que en estado seco posee una alta resistencia al esfuerzo cortante.

DEPÓSITOS ALUVIALES

Los suelos denominados aluviales son materiales transportados y depositados por el agua, éstos presentan una granulometría variada, con tamaños desde arcilla hasta gravas gruesas y boleos; son suelos con una distribución anisotrópica y con propiedades geotécnicas altamente variables (González de Vallejo, 2004).

Como se puede observar en la figura 2, en la zona noreste de la ciudad y a los márgenes de los ríos existentes como son: río el Zapatero, río Atoyac, río Alseseca y parte del antiguo río San Francisco desde bulevar 2 de octubre hasta Juan de Palafox y Mendoza se encuentran formaciones de origen aluvial.

De acuerdo a la información contenida en la zonificación de 1998, se sabe que en las márgenes del río Atoyac al sur de la ciudad, existen depósitos aluviales en estratos de más de 10 m, constituidos por arenas finas en estado suelto, prácticamente limpias y uniformes con presencia de un nivel freático superficial, dichas características hacen a esta zona propensa al fenómeno de licuación que se presenta cuando el suelo experimenta esfuerzos cortantes rápidos y de mayor magnitud.

CALIZAS

Este tipo de roca sedimentaria se caracteriza por estar constituida por carbonato de calcio y ser susceptible a la efervescencia ante la presencia de ácidos.

En la zona que se ubica en la parte sur – oriente del periférico ecológico (consulte figura 2) entre el camino al Batán y camino a Clavijero, se hace presente un importante afloramiento de roca caliza color gris, que constituye un lomerío suave, actualmente habitado en torno a una cantera de explotación de este material.

La roca existente en esta zona se encuentra fracturada sin presentar alguna dirección en particular, con presencia de lajas en espesores de 10 a 50 cm y está cubierta por una capa vegetal de poco espesor (Azomoza, et al, 1998).

BASALTOS Y ANDESITAS

Este tipo de rocas son de color oscuro y de origen ígneo, se hacen presentes en importantes afloramientos de la ciudad (consulte figura 2), formando los cerros de Loreto y Guadalupe, San Juan, Amalucan, Tepozúchitl, etc. se encuentran cubiertos por tobas y suelos tobáceos; y se sabe que estas formaciones presentan un estado sano o con grados medios de alteración.

ESCORIAS BASÁLTICAS

En la ciudad se hace presente y notable el cono volcánico del cerro de San Juan (La Paz), el cual ha sido formado por productos de proyección denominados piroclastos.

En el lugar predominan materiales gruesos de tamaño grava y mayores como bombas y escorias basálticas, que en conjunto forman depósitos aglomerados y, en menor proporción, brechas volcánicas cuando aparecen afloramientos de la roca basal (Azomoza, et al, 1998).

Las partículas entre 0.42 y 20 mm de tamaño son pavesas o lapillis (fragmentos pequeños); la fracción fina son cenizas que cubren superficialmente el cono y forman las cineritas o suelos tobáceos que aún se conservan en las zonas circundantes (Azomoza, et al, 1998).

Como se ha podido apreciar, en la figura 2 se ubican perfectamente delimitados los diferentes tipos de suelo predominantes en el área del valle de Puebla, estando presentes en mayor cantidad los depósitos eólicos de origen volcánico en el norte, al oriente con depósitos no consolidados superficialmente.

Al sur se puede apreciar claramente que abundan las arcillas expansivas, prácticamente desde el río San Francisco hasta las cercanías del Lago de Valsequillo; es importante mencionar los depósitos hidrotermales, basaltos y escorias basálticas, pues la presencia de éstos denotan la actividad volcánica que existió antiguamente en el valle de Puebla.

CAPITULO II. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

II.1 LOCALIZACIÓN

Las coordenadas geográficas extremas del estado de Puebla son: Al norte 20°50'24", al sur 17°51'39" de latitud norte; al este 96°43'29", al oeste 99°04'14" de longitud oeste. Puebla colinda al norte con Hidalgo y Veracruz; al este con Veracruz y Oaxaca; al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Guerrero, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo.

La ciudad de Puebla representa la cuarta ciudad más grande del país, después de la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, se encuentra rodeado por montañas y volcanes del eje neovolcánico transversal.

El estado de Puebla representa el 1.75% de la superficie del país (figura 4), cuenta con una población de 6, 168,883 habitantes, lo cual representa el 5.2 % del total del país (INEGI, 2015).

El municipio de Puebla se localiza en la parte centro oeste del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son: 19°02'43" latitud norte, y 98°11'51" latitud oeste, presente una altitud de 2147 msnm; como se puede apreciar en la figura 5 limita al norte con el estado de Tlaxcala, al sur con los municipios de Santo Domingo Huehuetlán y Teopantlán, al oriente con Amozoc, Cuautinchán y Tzicatlacoyan y al poniente con Cuautlancingo, San Andrés Cholula y Ocoyucan.

La ciudad de Puebla tiene una superficie de 544.712 kilómetros cuadrados (INEGI, 2010), lo que la posiciona en la ciudad más grande e importante de México sólo después de la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (Plan de desarrollo municipal, 2014).

II.2 OROGRAFÍA

En lo que respecta al valle de Puebla, y como se observa en la figura 6, al norte de la ciudad se encuentra el volcán de la Malinche, el cual es un volcán inactivo; su cima tiene forma de cresta dentada con varios picos, al lado sur presenta una eminencia llamada Xaltonally o Arenal del sol. Tiene un altitud de 4,420 metros y sus faldas se extienden

sobre un gran altiplano a 134 kilómetros, a su alrededor es notable por las rocas descubiertas de su cima y está formado por desprendimientos de la Sierra Nevada.

Las estribaciones suroccidentales de la Malinche así como una parte de su cumbre se localizan dentro del territorio municipal, cubriendo el noreste del mismo (INAFED, 2016).

En lo que respecta a la elevación, el municipio de Puebla se encuentra a una elevación promedio de 2147 msnm (INEGI, 2015), presentando una topografía en su mayoría plana, y con pocas variaciones bruscas de nivel, haciéndose notar en la ciudad: el cerro de San Juan (La Paz), el cerro de Loreto y Guadalupe, el cerro de Amalucan, y el cerro Tepoxuchitl.

II. 3 HIDROGRAFÍA

De acuerdo con la figura 7, los recursos hidrológicos con que cuenta el estado de Puebla, incluyen a fuentes de agua superficial y subterránea. Entre las primeras, se encuentran los ríos, arroyos y cuerpos de agua, como son lagos y presas. Las fuentes de agua subterránea comprenden el agua que se infiltra y se almacena en los materiales porosos y permeables del subsuelo. El agua subterránea puede percolar lentamente a través de estos materiales, formando mantos acuíferos y eventualmente puede aflorar a la superficie en forma de manantiales y posteriormente formar arroyos.

El municipio de Puebla pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las más importantes del estado que recorre el poniente del municipio de norte a sur y sirve en algunos tramos como límite con los municipios de Ocoyucan, San Andrés Cholula y Cuautlancingo; posteriormente cambia de curso hacia la depresión de Valsequillo donde se forma la presa Manuel Ávila Camacho o de Valsequillo de 405 millones de metros cúbicos de capacidad; esta obra ha hecho posible el establecimiento del distrito de riego de Valsequillo de 21,864 hectáreas de tierra laborable beneficiadas con riego completo (INAFED, 2016).

De las laderas de la Malinche descienden numerosas corrientes intermitentes que provocan inundaciones en la zona norte de la ciudad de Puebla en la época de lluvias; el

agua ha producido erosión muy fuerte en las laderas de más de 15 metros de profundidad. Uno de los arroyos principales, el Alseeca, transporta gran cantidad de material erosionado, provocando azolve en el vaso de Valsequillo (INAFED, 2016).

II.4 GEOLOGÍA

La naturaleza geológica del estado de Puebla es variada y bastante compleja, especialmente en su porción sur, donde se encuentran terrenos metamórficos con edades del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, los cuales se hallan yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de falla. Las rocas que los forman han sido afectadas por varias fases de metamorfismo y deformación a lo largo del tiempo geológico, y aún no existe la información suficiente para establecer un modelo evolutivo totalmente satisfactorio que explique las peculiaridades del sur de México. El más difundido de estos terrenos, dentro del estado, pertenece al Paleozoico Inferior, y se conoce con el nombre de Complejo Acatlán; aflora ampliamente en toda el área de la mixteca poblana. Sobre este basamento metamórfico, descansa una potente secuencia sedimentaria marina detrítica y carbonatada de edad mesozoica, que atestiguan la invasión oceánica en varios sectores de la entidad, la cual se extendió a gran parte del país; a finales de esta era y durante los inicios de la era cenozoica, las rocas sedimentarias formadas en los fondos marinos, fueron elevadas, plegadas y fracturadas. Después de la etapa compresiva, se produce la emisión de materiales volcánicos a través de las fracturas corticales. El más reciente de este volcanismo, está representado por enormes volúmenes de lavas y piroclastos de composición basáltico-andesítica, que constituyen la provincia de la Faja Volcánica Mexicana o Eje Neovolcánico. La erosión de las rocas expuestas ha dado origen a la formación de toda una serie de depósitos continentales; tanto clásticos, como carbonatados y evaporíticos (INEGI, 2000).

En el estado de Puebla se pueden encontrar formaciones de roca ígnea extrusiva, intrusiva, sedimentaria y metamórfica (consultar figura 8).

En la ciudad existen diversos afloramientos de rocas ígneas y sedimentarias, así como depósitos de suelos tobáceos, aluviales y lacustres. Está rodeada de formaciones

volcánicas, tales como: La Malinche, el Iztaccíhuatl, el Pico de Orizaba y el Popocatepetl, que corresponden al Plioceno Medio de las Eras Geológicas.

Estructuralmente, se presentan fallas geológicas importantes en el estado y ciudad capital: Primarias (figura 9), en un sistema con direcciones E-W y NE-SW, denominadas Zacamboxo, Clarión, Popocatepetl y Malinche y, Secundarias, una en dirección E-W, que une entre sí los cerros de Loreto y Guadalupe, San Juan (La Paz) y Amalucan y, otra, en dirección prácticamente normal, que corre aproximadamente de los balnearios “Agua Azul” a “Rancho Colorado” (Azomoza, et al, 1998).

II.5 SISMICIDAD

En cuanto a la zonificación sísmica del municipio de Puebla se cuenta con el trabajo de investigación realizado por Ruiz, 1993 en el cual se propone el mapa de zonificación sísmica mostrado en la figura 10. En dicha propuesta se observan dos zonas importantes presentes en el valle de Puebla: La zona A con un coeficiente sísmico de 0.24 y periodo de 0.60 y la zona B con un coeficiente sísmico de 0.36 y un periodo de 1.00.

Observando la propuesta en comento, y contrastando con la zonificación geotécnica realizada por Azomoza, et al, 1998; se observa que las zonas que están conformadas por basaltos, calizas, y parte de los depósitos eólicos de origen volcánico se encuentran dentro de la zona A, considerados como terreno firme, lo cual es congruente con la descripción geotécnica de estos materiales; y en su mayoría el área catalogada como depósitos eólicos de origen volcánico forman parte de la zona B, o terreno intermedio; sin embargo en la zonificación geotécnica, particularmente en la zona de arcillas expansivas se puede observar que está catalogada como zona tipo A, o terreno firme, lo cual si se analiza en condiciones secas es congruente, pero con presencia de agua se debe tomar en cuenta el comportamiento expansivo de las arcillas.

Es importante mencionar que el H. Ayuntamiento del Municipio de Puebla 2008 – 2011 presentó una Microzonificación sísmica partiendo de los trabajos realizados por Auvinet, 1976, Ruiz et al., 1993, Chávez-García, et al., 1995 y Azomoza, et al. 1998, la cual se muestra en la figura 11.

En esta zonificación se pueden apreciar cuatro zonas:

Micro zona A. Se caracteriza por tener un suelo firme de rocas calizas o flujos de lava basáltica y/o andesitas, los periodos dominantes estimados son de 0.1 a 0.3 segundos.

Micro zona B. Corresponde a las capas de travertinos que se distribuyen desde Agua Azul hasta Rancho Colorado.

Micro zona C. Tiene mayor distribución que las demás, corresponde a los suelos blandos de origen aluvial o de tobas andesíticas, los periodos dominantes estimados son de 0.8 segundos.

Micro zona D. Esta se localiza en el sector NE y en la zona de influencia del río Atoyac, los periodos dominantes estimados fueron de 2 a 2.5 segundos.

De igual forma existen en el reglamento de construcción de la ciudad de Puebla, factores correlacionados con base a la prueba triaxial en suelos limosos o arcillosos, véase tabla 1.

II.6 POBLACIÓN Y URBANIZACIÓN

Según los datos del Anuario estadístico y geográfico de Puebla (INEGI, 2015), la ciudad de Puebla tiene una población total de 1, 634, 141 habitantes, de los cuales, del género masculino son 779,544 habitantes, y 854,597 del género femenino.

En cuanto a vivienda y urbanización se refiere, la ciudad de Puebla cuenta con un total de viviendas particulares habitadas de 406,507; con un promedio de 3.78 habitantes promedio por vivienda (INEGI, 2015).

De acuerdo al Plan de desarrollo municipal, 2014:

“En las últimas tres décadas, las políticas urbanas privilegiaron el crecimiento extensivo de la ciudad en una superficie extendida de 223.94 kilómetros cuadrados. Con esta tendencia, en menos de 10 años la población rebasará los 2 millones de habitantes, para entonces se requerirán alrededor de 5 mil hectáreas y más de 125 mil viviendas adicionales”

“Este desorden urbano propició el surgimiento de 180 asentamientos humanos irregulares en una superficie de 76.1 kilómetros cuadrados que significan el 35% del área urbana total, de los cuales 42 kilómetros cuadrados, están ubicados sobre terrenos de régimen ejidal, esto es 55%; el resto: 34.1 km² se sitúa sobre suelo de régimen privado”

“Actualmente, Puebla cuenta con más de mil colonias, de las cuales el 20 % son irregulares. Se cuenta con alrededor de 300 fraccionamientos; de éstos, sólo el 40% se encuentra registrado”

La urbanización principalmente se extendió hacia el sur de la ciudad, esto debido a la llegada de empresarios que han invertido en la construcción de unidades habitacionales, así como también a la plusvalía que ha detonado en la zona sur – poniente, principalmente debido a la construcción del periférico ecológico y la modernización de la vía Atlixcáyotl, dicha zona ha tenido un mayor crecimiento por la presencia de tiendas departamentales y plazas comerciales, mencionando también los distintos fraccionamientos residenciales como son: La vista, Lomas de Angelópolis, Santa Fé, etc., así como la presencia de edificaciones verticales como son: Las Torres JV, Adamant entre otros; toda esta infraestructura y edificación influye en el crecimiento urbano en el área antes mencionada.

En referencia a lo anterior es importante mencionar que a partir del año 2013, el Congreso del Estado aprobó una actualización al decreto de 1962, el cual contempla una nueva delimitación para los municipios de San Andrés Cholula y Puebla (Ver figura 12).

Con los nuevos linderos, Puebla se quedó con la zona comercial de Angelópolis, el Parque Lineal, el Tecnológico de Monterrey, el Complejo Cultural Universitario (CCU) de la BUAP y el Centro Integral de Servicios (CIS).

Respecto a las colonias, Puebla mantiene: Arcos del Sur, Bosques de Angelópolis, Concepción Las Lajas, Cortijo La Herradura, Estrellas del Sur, La Flor de Nieve, Rinconada Suroriente, Rinconada sur-poniente, San José Vista Hermosa y San Miguel La Rosa.

San Andrés Cholula abarca las colonias: Camino Real a Cholula, Concepción La Cruz, Concepción La Cruz (ampliación), Conjunto Habitacional Momosa, Conjunto Residencial El pilar, Conjunto Habitacional Villas de Atlixco, Cortijo Angelópolis, Fuentes de Angelópolis, Geovillas Atlixcáyotl, Geovillas Atlixcáyotl La Hacienda, Jardines de San José, Puerta Paraíso, Residencial Las Palmas, Residencial San Ángel, Rincón de San Andrés, Villa Alejandra y Villa de Zavaleta.

De lo anterior, se puede resumir que gran parte del crecimiento urbano que tenía la ciudad de Puebla ahora pertenece al municipio de San Andrés Cholula, división política que no será considerada para efectos del presente estudio.

II.7 CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO

Para efecto de conocimiento y enriquecimiento de la presente investigación se abordan las características demográficas de la ciudad de Puebla, considerando los parámetros de los Anuarios estadísticos y geográficos de Puebla (INEGI, 2015) desde el año de 1998 a 2015, representados en la figura 13, donde se observa que en estos años la cantidad de habitantes en Puebla creció el 33.66%.

En el año de 1998 la población total en la ciudad de Puebla era de 1, 222,569 habitantes, de los cuales 587,326 eran del sexo masculino y 635,243 del sexo femenino; para el año 2010 esta cifra se incrementó considerablemente, llegando a 1, 590,439 pobladores; número que ha seguido en aumento llegando a los 1, 634,141 para el año 2015, de los cuales 779,544 son hombres y 854,597 mujeres.

Como se puede apreciar, del año 1998 al 2015 hubo un aumento de la población de 411,572 habitantes en la ciudad de Puebla, número bastante considerable si tomamos en cuenta que es aproximadamente una cuarta parte del total de habitantes, y la ciudad se fundó en el año de 1531.

II.8 CRECIMIENTO URBANO

La expansión de la superficie urbana de la ciudad de Puebla inició a la mitad del siglo XX, para esto, varios factores permitieron que la ciudad se extendiera desde su Centro

Histórico hacia la periferia, entre los cuales podemos mencionar: creación de fraccionamientos, urbanización irregular, construcción de vialidades, intereses económicos y políticos, crecimiento de la industria, juntas auxiliares y municipios conurbados.

De acuerdo a los Anuarios estadísticos y geográficos de Puebla (INEGI, 2015) desde el año de 1998 a 2015 se ha tenido un incremento considerable en cuanto al número viviendas habitadas en relación al promedio de habitantes en la ciudad, lo cual se puede observar en la figura 14.

En el año 2015, el INEGI registró nuevamente los parámetros del año 2010, considerando un total de 406 mil 507 viviendas habitadas; 406 mil 408 están clasificadas como viviendas particulares y de éstas 307 mil 213 son catalogadas como casas; lo anterior se puede apreciar de mejor manera en la tabla 2.

En lo que respecta al crecimiento urbano actual, se ha identificado un amplio desarrollo en comparación con el que existió en el año de 1970 en cuanto a extensión territorial, ya que en esa época era de 22.83 kilómetros cuadrados, y aumentó a 223.94 kilómetros cuadrados para el año de 2010, situación que fue acompañada del crecimiento de la población; dichos crecimientos modificaron la densidad de población, la cual pasó de 233.37 habitantes por hectárea en 1970 a 68.76 habitantes por hectárea en 2010 (consulte tabla 3).

En referencia a lo anterior, y basado en el plan de desarrollo urbano 2014-2018, se muestra en la figura 15 el crecimiento de la mancha urbana en la ciudad de Puebla, desde el año de 1975 al año 2010, en la cual se manifiesta gráficamente el crecimiento de la ciudad y se identifican las zonas de mayor asentamiento urbano.

II.9 FRACCIONAMIENTOS

La construcción en lotificaciones ha generado un incremento considerable en la mancha urbana y por ende ha contribuido en el crecimiento de la ciudad; de acuerdo a esto y a la posibilidad de adquirir grandes áreas para su venta en lotes, el crecimiento urbano se ha dado de manera espontánea durante las últimas décadas, contribuyendo en la población

de la periferia de la ciudad. Este es el caso de los distintos desarrollos inmobiliarios horizontales construidos en Puebla, por mencionar algunos como: Los Héroes sección I, Los Héroes sección II, Lomas de Angelópolis I, II y III, La Vista, Loreta Residencial, Residencial María Luisa, Casas Geo, Bosques de la Noria, etc.

La construcción de los fraccionamientos y conjuntos residenciales antes mencionado han generado el aumento en el asentamiento urbano horizontal principalmente en la zona sur de la ciudad, factor que ha sido detonante la plusvalía y desarrollo económico en dicha área.

II.10 JUNTAS AUXILIARES

El municipio de Puebla actualmente cuenta con 17 juntas auxiliares; éstas han influido ampliamente en la extensión habitable en la ciudad de Puebla, pues el número de habitantes ha crecido considerablemente al paso del tiempo, y debido a que los asentamientos urbanos ya no sólo se concentran en el centro del municipio, si no que ahora también se comienza a extender a las juntas auxiliares más alejadas, las cuales en algún momento determinado se tendrán que zonificar para conocer el tipo de suelo predominante; la ubicación de estas se puede apreciar en la figura 16.

Las juntas auxiliares que conforman al municipio de Puebla cuentan cada una con una población de:

1. Ignacio Romero Vargas: 51,379 habitantes
2. Ignacio Zaragoza: 89,709 habitantes
3. La Libertad: 30,544 habitantes
4. La Resurrección: 78,888 habitantes
5. San Andrés Azumiatla: 8,509 habitantes
6. San Baltazar Campeche: 341,640 habitantes
7. San Baltazar Tetela: 3,683 habitantes
8. San Felipe Hueyotlipan: 33,596 habitantes
9. San Francisco Totimehuacan: 186,715 habitantes
10. San Jerónimo Caleras: 73,771 habitantes

11. San Miguel Canoa: 14,863 habitantes
12. San Pablo Xochimehuacan: 64,824 habitantes
13. San Pedro Zacachimalpa: 4,387 habitantes
14. San Sebastián de Aparicio: 64,086 habitantes
15. Santa María Guadalupe Tecola: 1,414 habitantes
16. Santa María Xonacatepec: 23,379 habitantes
17. Santo Tomás Chautla: 6,575 habitantes

CAPITULO III. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y PROPIEDADES DEL SUELO

III.1 TRABAJOS REALIZADOS

Posterior a la investigación realizada y expuesta en los Capítulos I y II, en los cuales se describen las principales características y clasificación SUCS del tipo de suelo existente de acuerdo a la última zonificación (Azomoza, et al, 1998), así como también los factores que han intervenido en el crecimiento demográfico, población y urbanización, detalles geológicos y zonificación sísmica de la ciudad; es ahora más claro el objetivo del presente trabajo, ya que como bien se ha reiterado en párrafos anteriores, el crecimiento de la mancha urbana ha sobrepasado el área de la última zonificación, por lo cual, para realizar la caracterización, se tuvo acceso al archivo privado de la empresa Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD), y para efectuar la revisión de las características del suelo se empleó inicialmente un total de 2,367 estudios, mismos que fueron revisados, primeramente para seleccionar aquellos que brindaran mayor información geotécnica, de igual forma fueron analizados y ubicados geográficamente en el valle de la ciudad de Puebla, apoyándose en el software Google Earth, mismo que fue de gran ayuda para el reconocimiento y delimitación de la zona de interés; en la figura 17 se presenta la ubicación de los estudios en la ciudad, en donde se observa con claridad la tendencia del crecimiento urbano.

Derivado del primer filtro de estudios y con el previo conocimiento de la investigación contenida en el Capítulo II, se comprobó que el crecimiento demográfico tiende principalmente hacia la periferia de la ciudad, observando que la zona Sur-Poniente de la misma, presenta un crecimiento urbano considerable y digno de interés, dicha zona se limitará al norte con la carretera Federal Puebla-Atlixco, iniciando en la misma, llamada Blvd. Atlixco a la altura del río Atoyac como límite de la zona, al sur iniciando desde el Blvd. Del Niño Poblano y finalizando en la calle Rosales o Av. 145 pte. sobre la Av. 11 sur, considerando como límite al poniente a la población de Santa Clara Ocoyucan; las fronteras mencionadas se puede apreciar en la figura 18.

III.2 TIPO DE SONDEOS Y MUESTREO

Como bien se sabe, entre mayor profundidad de muestreo se tenga, mayor es el número de estratos posibles a encontrar, obteniendo un aumento en la cantidad de parámetros y características de los estratos del subsuelo, por lo cual se revisaron los estudios que integraban la zona de interés, obteniendo la cantidad para dicha área de 75, incluyendo sondeos de penetración estándar (SPT) y de pozo a cielo abierto (PCA); mediante esta información se procedió a delimitar un área específica que fuera lo suficientemente basta para trabajar con este número de sondeos, esto se puede apreciar en la figura 19.

Con esta cantidad de sondeos se tiene una relación promedio de **1.55** sondeos por kilómetro cuadrado analizado, lo cual es un valor muy aceptable para el área de interés que consta de **48.28** kilómetros cuadrados de superficie.

Se empleó la información de 45 sondeos efectuados por penetración estándar a profundidades desde 6 hasta 25 metros; y 30 sondeos de tipo pozo a cielo abierto a profundidades variables que llegan a los 3.5 metros.

III.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

De acuerdo a la revisión de los estudios de interés, se manifiesta que a todas las muestras recuperadas le fueron efectuadas las pruebas necesarias para conocer sus propiedades índice y clasificación de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), obteniendo a su vez el contenido de agua. Para las muestras alteradas y representativas, se tiene sus propiedades índice (límites de consistencia, contracción lineal, densidad de sólidos y porcentaje de partículas finas).

En las muestras inalteradas de tipo cúbicas se efectuaron pruebas mecánicas, tales como resistencia al corte en compresión triaxial no consolidada no drenada, así como también se determinaron las características de compresibilidad mediante pruebas de consolidación unidimensional; dichas propiedades mecánicas no se consideraron en el presente trabajo de investigación, debido a que la presente zonificación se basa exclusivamente en las propiedades físicas del suelo.

En núcleos de roca se obtuvo el índice de calidad (ICR) y su estructura secundaria. También se determinaron los parámetros esfuerzo deformación de los suelos mediante correlaciones con el número de golpes de la prueba de penetración estándar.

III.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Todos y cada uno de los estudios de mecánica de suelos fueron revisados para obtener la mayor cantidad de información a utilizar en la zonificación geotécnica; se consideró la elevación sobre el nivel del mar de cada uno de los sondeos, y con la ubicación geográfica se pudo obtener las coordenadas UTM X y Y, así como sus elevaciones. En la tabla 4, se presentan las propiedades índice: contenido de agua, límite líquido e índice plástico y el nivel de aguas freáticas (NAF).

Es importante mencionar que como resultado del análisis de la información se definió que en la zona sur – poniente prevalecen los estratos de arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH y CL), intercalados con arena arcillosa (SC).

También es importante mencionar, que en la zona donde cruza el río Atoyac y el Blvd. del Niño Poblano, se encontró arcilla arenosa de alta plasticidad (CH), color gris claro, presentando abundantes gravas de travertino de hasta 1" de tamaño, esto a partir de una profundidad aproximada de 6.00 metros, consecutivamente los resultados muestran un estrato de arena arcillosa de color café grisáceo (SC), presentando abundantes gravas y fragmentos de travertino, aproximadamente desde los 7.40 m hasta los 8.00 m, posteriormente se encontró travertino fracturado con una matriz arcillo arenosa hasta la profundidad explorada de 9.40 m, lo cual indica que en dicha área no solo se encuentran arcillas expansivas, si no que a partir de cierta profundidad se puede encontrar roca travertino; el mismo caso ocurre al margen del río Atoyac, en la zona conocida como las Ánimas, donde la exploración evidenció una capa de aproximadamente 3.40 m de roca travertino de muy mala calidad, presentando alto grado de alteración en forma de vesículas y tubificaciones, esto a partir de alrededor de los 7.60 m de profundidad.

Cabe mencionar que este tipo de particularidades no se presentaron en el resto de los sondeos. Es importante poner atención en la falla que va desde el balneario Agua

Azul hasta el balneario Rancho Colorado, se identificó que esa es la misma dirección en que se encuentra material de roca travertino de muy mala calidad, lo cual en un futuro debería tomarse en cuenta si se desea construir una cimentación a profundidades entre los 4 y 13 metros, considerables dentro de la línea de falla antes mencionada.

En la zona de Lomas de Angelópolis, específicamente al sur de la caseta de cobro en dirección a Atlixco, y hacia la calle 11 Sur, se hace presente un área notable de arena fina a media arcillosa de compacidad densa, presentando raíces en la parte superior y disminuyendo su presencia con la profundidad, misma que contiene grava de 1/4" de tamaño máximo, incrementando su tamaño con la profundidad hasta fragmentos de roca de 20".

Derivado de la información obtenida (coordenadas X, Y) y las profundidades de los estratos, se procedió a realizar un procesamiento de la información con ayuda del programa Surfer, con esta herramienta se logró hacer una representación de las curvas de nivel del terreno natural, y las curvas del estrato de arcillas; estas representaciones se observan en las figuras 20 y 21, en las cuales se manifiesta la altimetría que presenta el terreno natural y el estrato de arcillas, mostrando las elevaciones correspondientes; posteriormente se realizó el procesamiento de los valores haciendo una representación por medio de vectores, en los cuales se puede observar la dirección que siguen los estratos conforme a los desniveles que manifiestan, esto indica el movimiento que existió en los materiales en algún momento durante la formación de los estratos, y se representa en las figuras 22 y 23; como se puede observar en dichas figuras, se tienen desniveles en los estratos de arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH y CL) en el área correspondiente al cruce del periférico ecológico y el Blvd. Atlixcayotl, es decir, en la zona de Vista y Santa Fe, así como también un desnivel más notable precisamente donde se encuentra el material areno-arcilloso (SC) ya comentado anteriormente, a un costado de la caseta de cobro de la Vía Atlixcayotl.

Lo anterior se representó mediante un mallado en 3D del terreno natural y de los estratos de arcilla de alta y baja plasticidad (CH y CL), representados en las figuras 24 y 25, en las cuales se puede apreciar claramente este desnivel en comento, dichos modelados recrean la formación de los estratos, haciendo posible visualizar las

deformaciones aproximadas del subsuelo. Estos modelos representan los estratos de acuerdo a la profundidad máxima explorada de los sondeos, mostrando las deformaciones topográficas aproximadas presentes en los estratos.

Se realizaron cortes estratigráficos que cruzan la zona de estudio en distintas ubicaciones, mismas que se observan en la figura 26, y cuyas particularidades se describen a continuación:

Corte 1. Predomina el material de arcilla arenosa de baja plasticidad, hasta una profundidad máxima explorada de 23.00 m, presentándose el nivel de agua freática en algunas zonas a la profundidad media de 3.00 m (véase figura 27).

Corte 2. Se observan tres tipos de material predominantes, en los hombros del río Atoyac y sus cercanías está presente el material de arena – limosa (SM), mezclado en algunas zonas con roca color gris; de igual manera se encuentra arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH y CL), dichos materiales se encuentran divididos por el río (véase figura 27).

Corte 3. Los materiales predominantes visualizados en el corte estratigráfico corresponde a una arcilla de alta plasticidad (CH) y arena arcillosa (SC), contemplando profundidades promedio de 4.00 m. Existen también zonas de arena limosa (SM) mezclada con arcilla de baja plasticidad (CL) y grava (véase figura 28).

Corte 4. Se aprecia una deformación cóncava en el estrato de arcilla arenosa de alta plasticidad (CH), aunado a ello se hace presente en dos sondeos exploratorios la presencia de nivel de aguas freáticas, posiblemente interconectadas entre sí, por un lado proveniente del material areno – arcilloso (SC), continuando el flujo del agua entre los estratos de arcilla de alta y baja plasticidad (CH y CL) (véase figura 28).

Corte 5. En el margen izquierdo del corte estratigráfico se observa la presencia de estratos de diferente material, predominando la arcilla de baja plasticidad (CL), seguido por la presencia de arena limosa (SM) y limo de baja plasticidad (ML), haciendo presencia también las arcillas arenosas de alta plasticidad (CH) (véase figura 29).

Corte 6. La mayor presencia de material en este corte estratigráfico corresponde a las arcillas arenosas de baja plasticidad (CL), las cuales se encuentran entre dos capas de arcilla arenosa de alta plasticidad (CH), estando presente también material tobáceo (arena arcillosa SC) (véase figura 29).

Corte 7. Se aprecia nuevamente que el río Atoyac divide dos materiales, las arcillas de alta plasticidad (CH) y las arcillas de baja plasticidad (CL), habiendo presencia de una delgada capa de material limoso de alta plasticidad (MH) bajo el estrato de arena arcillosa (SC) (véase figura 30).

Corte 8. En este corte estratigráfico que va desde el fraccionamiento Lomas de Angelópolis hasta Ciudad Judicial, se puede apreciar la presencia de distintos materiales, siendo estos: arcilla de baja plasticidad (CL), arcilla de alta plasticidad (CH), arena arcillosa (SC), limo de baja plasticidad (ML), arcillas orgánicas y limos orgánicos de media a alta plasticidad (OH), éste último no muy recomendable para cimentar (véase figura 30).

CAPITULO IV. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL ÁREA SUR – PONIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA

De acuerdo al análisis de la información presente en los estudios de mecánica de suelos y en particular a las pruebas de laboratorio realizadas, tales como son: contenido de agua, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, clasificación SUCS y con base a los trabajos que anteceden al presente, la zona sur – poniente del valle de la ciudad de Puebla se puede clasificar de la siguiente manera:

- En el 65.33 % del área de la zona de interés predomina el material conformado por arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH, CL).
- En el 25.33 % del área predomina el material conformado por arena arcillosa de alta y baja plasticidad (SC).
- En el 9.34 % de la zona predomina la arena limosa (SM), y en menor proporción la roca travertino de mala calidad.

Como se puede observar y comparando con la geología de la zona, se corrobora que el suelo predominante son las arcillas de alta y baja plasticidad, presentando un contenido de agua que varía del 22 % al 80 %, un límite líquido que va de 26 % hasta 95 % y un índice de plasticidad con valores de 17 % hasta 70 %; aunque una cuarta parte de la zona presenta suelo tobáceo, conocido como tepetate, el cual estaría considerado como terreno tipo B o intermedio, evidencia de la actividad volcánica en el área de estudio; desde el punto de vista geotécnico, en la zona de interés existen materiales que presentan una de las mejores condiciones de trabajo para el constructor, pero también estratos con arcilla de alta plasticidad (CH) que al contacto con el agua definitivamente no resulta recomendable para cimentar, pero en estratos inferiores podemos encontrar material de arena arcillosa (SC), que podrían brindar mayor soporte a las cimentaciones.

En la figura 31 se presenta la propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad, superpuesta en el mapa del software Google Earth, en donde se pueden identificar los suelos antes mencionados, destacando la zona de arcillas arenosas de baja

plasticidad (CL) que cubre desde el bulevar Atlixco hacia el norte, contemplando los fraccionamientos: La vista, Santa fé y gran parte del bulevar Las torres, así como la localidad de Santa Clara Ocoyucan; de igual forma se puede notar la presencia de material arcillo arenoso de alta plasticidad (CH) cubriendo áreas importantes, cercanas al bulevar del Niño poblano y gran parte de Lomas de Angelópolis.

Es importante mencionar la presencia de material areno-arcilloso de baja plasticidad (SC), este material resulta ser de buena calidad y es conocido como tepetate, representado conjuntamente con los otros tipos de suelo en la propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad de Puebla (figuras 32 y 33).

En general el tipo de material más abundante es el de arcilla arenosa de baja plasticidad (CL), predominando desde el río Atoyac hacia el norte, y arcilla arenosa de baja plasticidad (CH) hacia el sur del cauce del río.

CONCLUSIÓN

En la zona de estudio predominan los suelos tobáceos, productos de la actividad volcánica que existió antiguamente, este tipo de suelo considera a las arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL), las arenas arcillosas de baja plasticidad (SC), el material conocido como aluvi3n en el margen del r3o, presentándose en abundancia en la intersecci3n del r3o Atoyac y el periférico ecol3gico, lugar donde el r3o hace cambio de sentido e incluso los suelos limo arenosos (ML) o arenas limosas (SM) encontrados en lunares dentro del 3rea, es importante la presencia de la falla local que atraviesa la ciudad, misma que en esta zona se hace notar con la presencia de roca travertino de mala calidad encontrada bajo los estratos de arena arcillosa (SC) y arcilla arenosa (CH y CL).

El estudio de esta 3rea en particular es una ampliaci3n a la zonificaci3n propuesta por Azomoza, por lo cual es evidente que con la cantidad de informaci3n que se posee a la fecha (2,367 estudios), se puede realizar una actualizaci3n que comprenda toda el 3rea urbana del valle de Puebla, lo cual aportará mayor conocimiento a los ingenieros geotecnistas para tener una visi3n amplia y orientativa del tipo de suelo que pudiesen encontrar.

Como se coment3 en un principio, este trabajo parte de la zonificaci3n geot3cnica realizada por Azomoza en 1998, aportando una ampliaci3n a la misma, y por ende una actualizaci3n de la carta de zonificaci3n del 3rea urbana del valle de Puebla (figura 34), siendo una contribuci3n valiosa para los ingenieros geotecnistas y especialistas afines; se espera sea una motivaci3n para continuar con los trabajos de caracterizaci3n y zonificaci3n geot3cnica de las diferentes ciudades de la rep3blica mexicana.

REFERENCIAS

- Azomoza, G., Vera, A. y Reyes L. (1998). “Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla”, *Memorias XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Publicación SMMS, Puebla, PUE.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004). “Ingeniería Geológica”. Madrid: Pearson Educación.
- INAFED, 2016, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.
- INEGI, 1998, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 1999, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2000, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2001, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2002, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2003, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2004, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2005, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2006, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2007, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2008, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2009, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2010, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2011, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2012, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2013, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2014, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- INEGI, 2015, Anuario estadístico y geográfico estadístico de Puebla.
- Ingeniería Civil en Desarrollo, S. A. de C. V., 1998-2016, Archivo Particular, Puebla, Pue.
- Plan de desarrollo municipal, 2014-2018. Gobierno municipal, Puebla, Pue.

ANEXO. FIGURAS

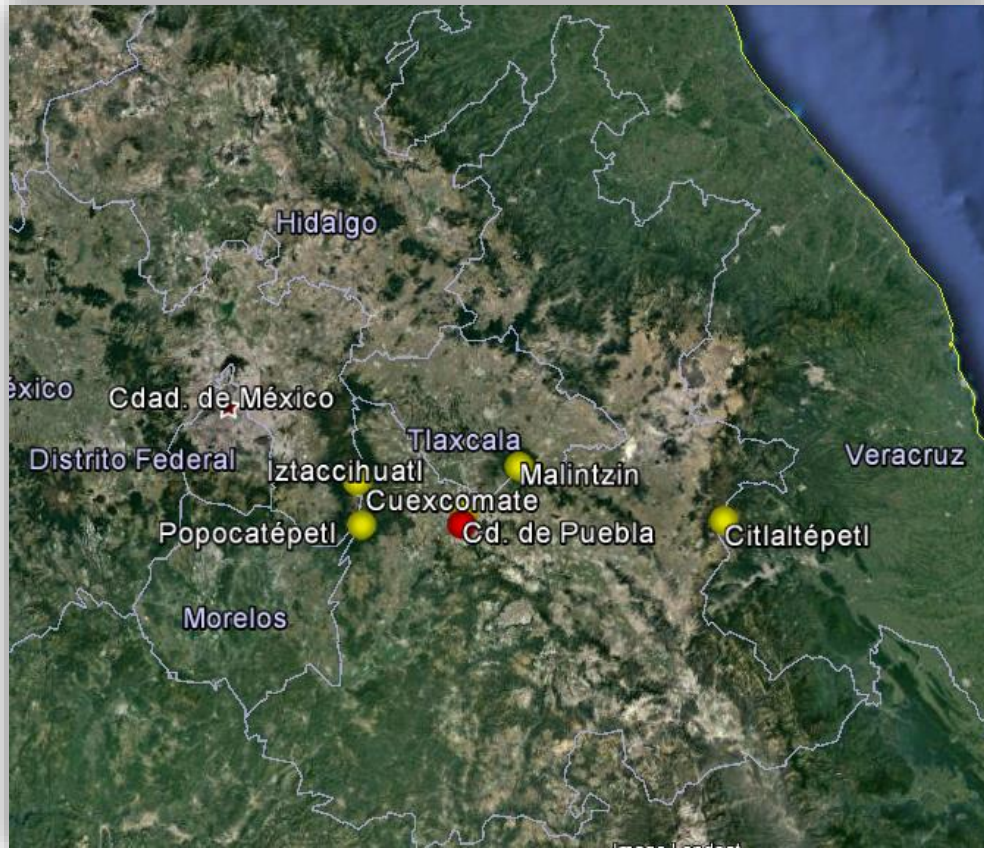


Figura 1. Ubicación de las formaciones volcánicas que rodean al valle de Puebla. Fuente: Google Earth.

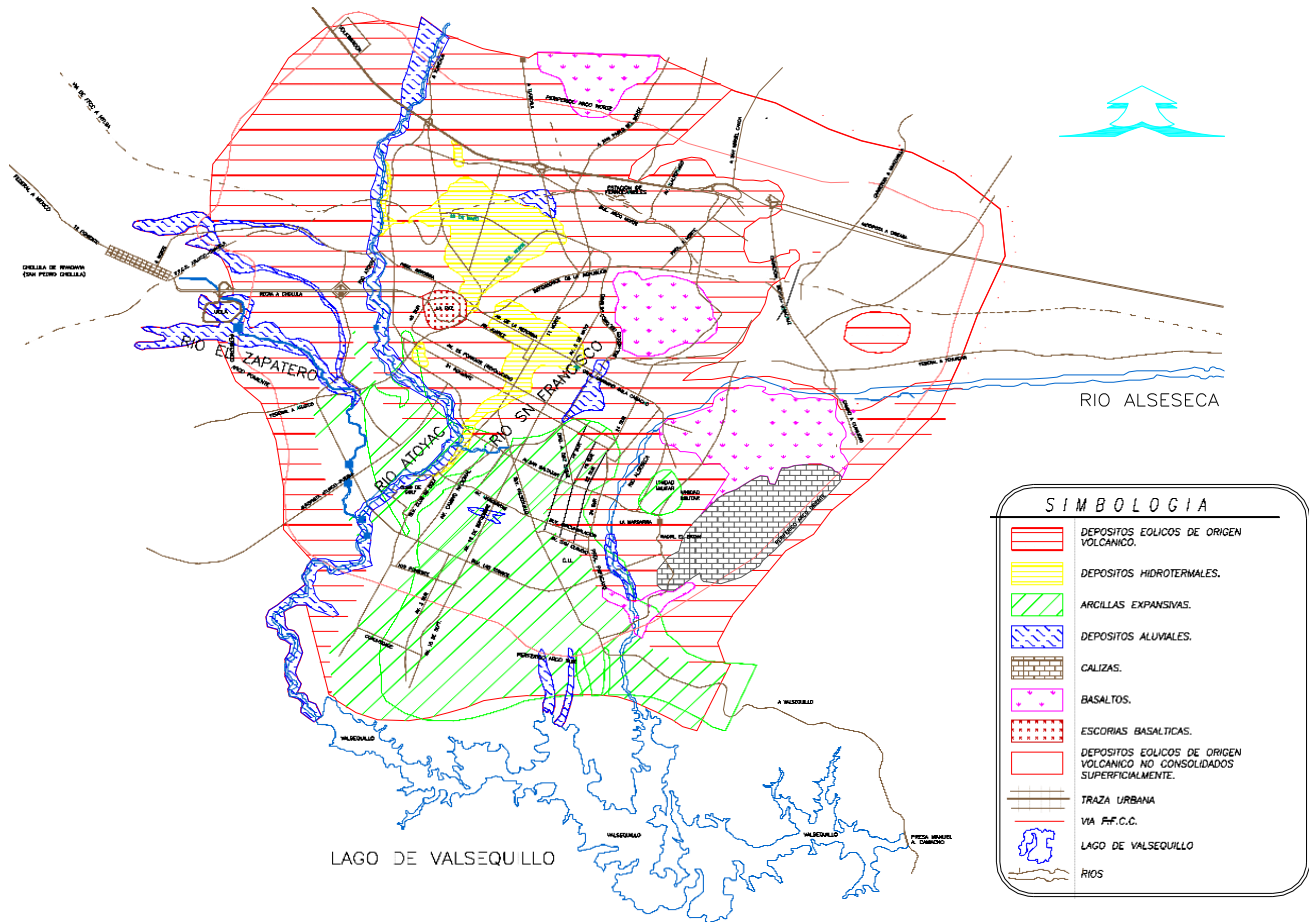


Figura 2. Carta de zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla, Azomoza, et al, 1998.

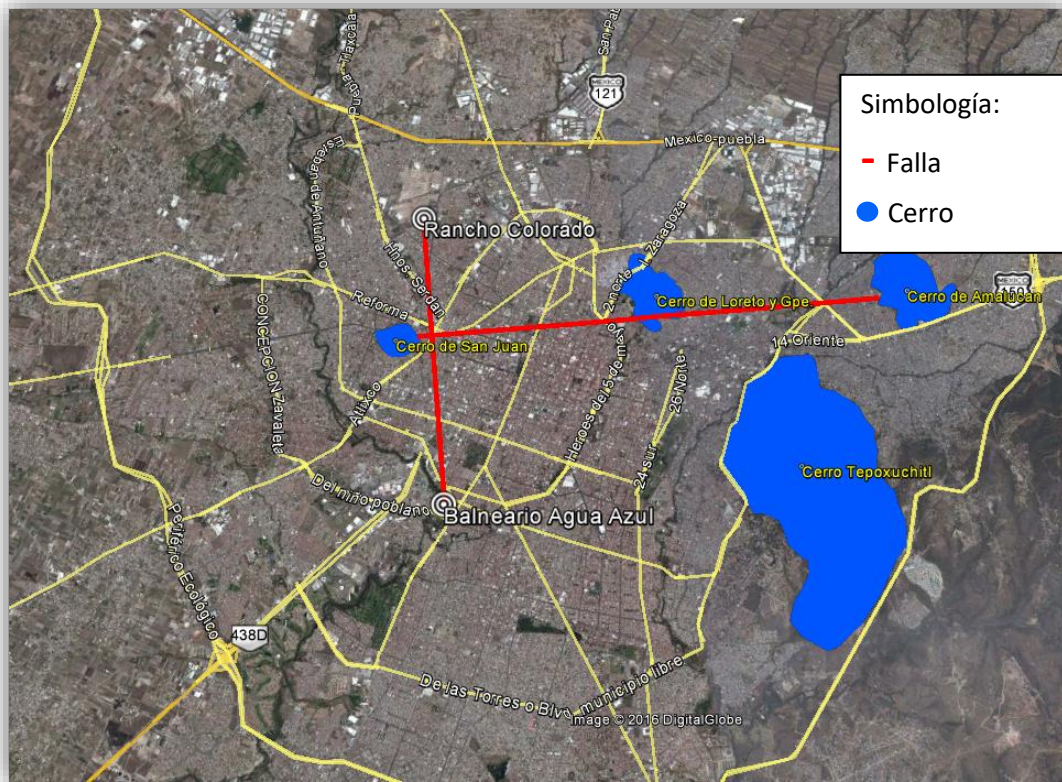


Figura 3. Fallas geológicas en el área urbana (INEGI, 2015).

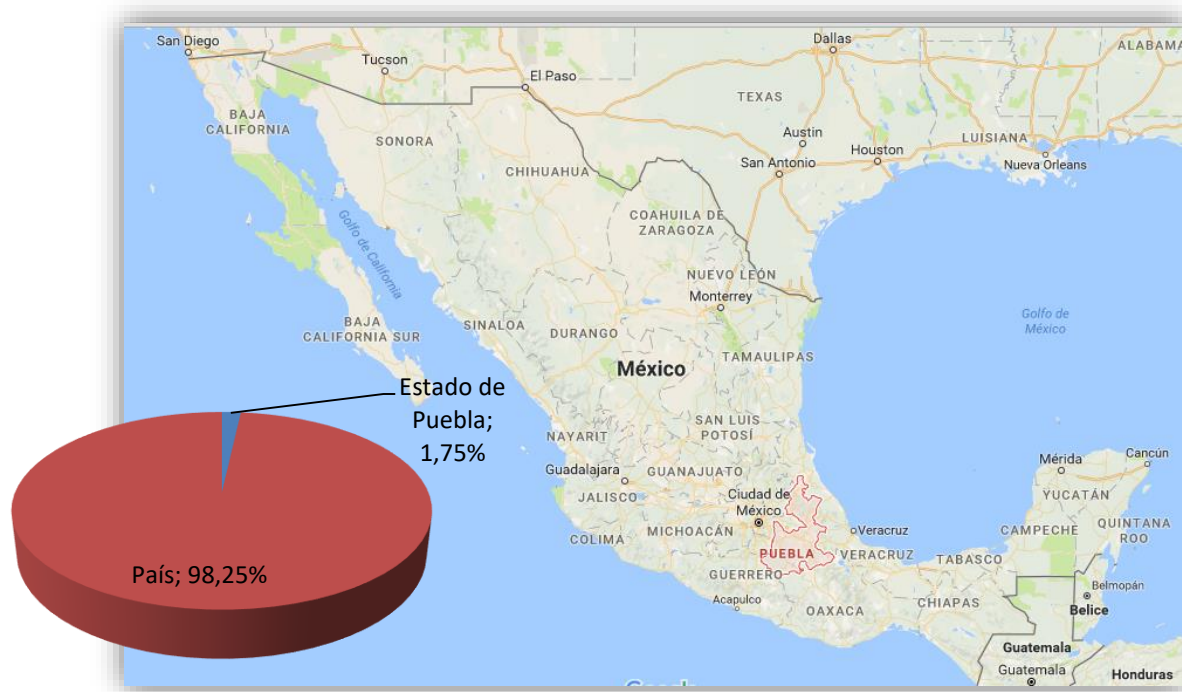


Figura 4. Superficie de Puebla. Fuente: Google Maps.

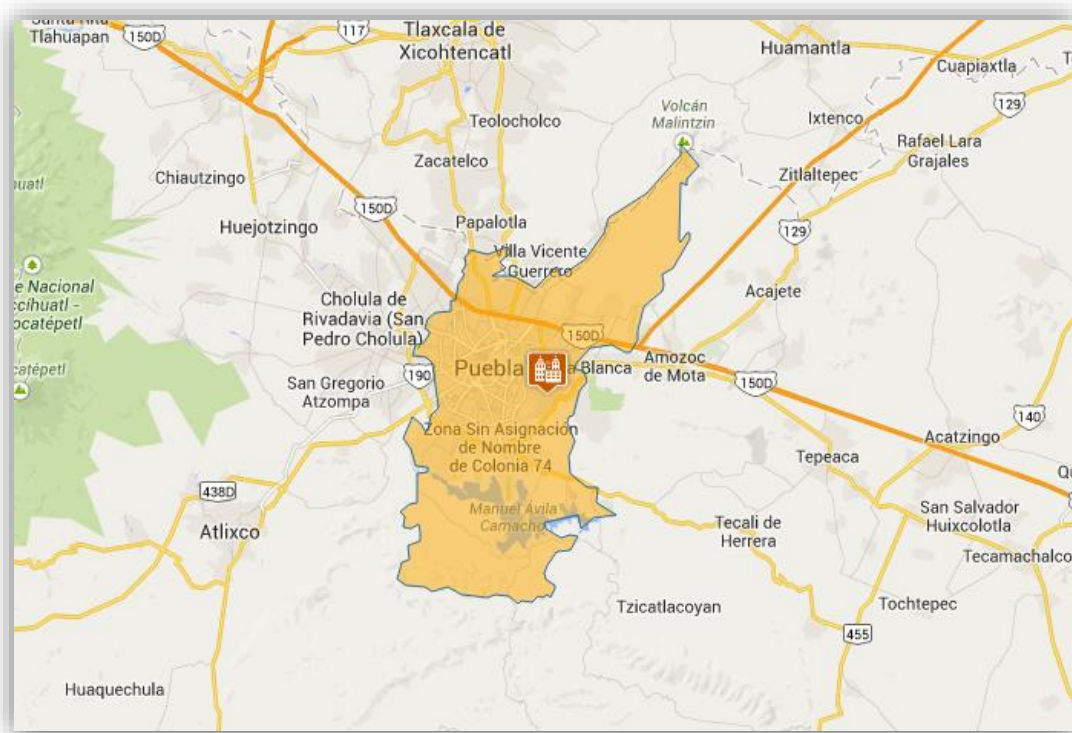


Figura 5. Delimitación del municipio de Puebla. Fuente Google Maps, (INEGI, 2016).

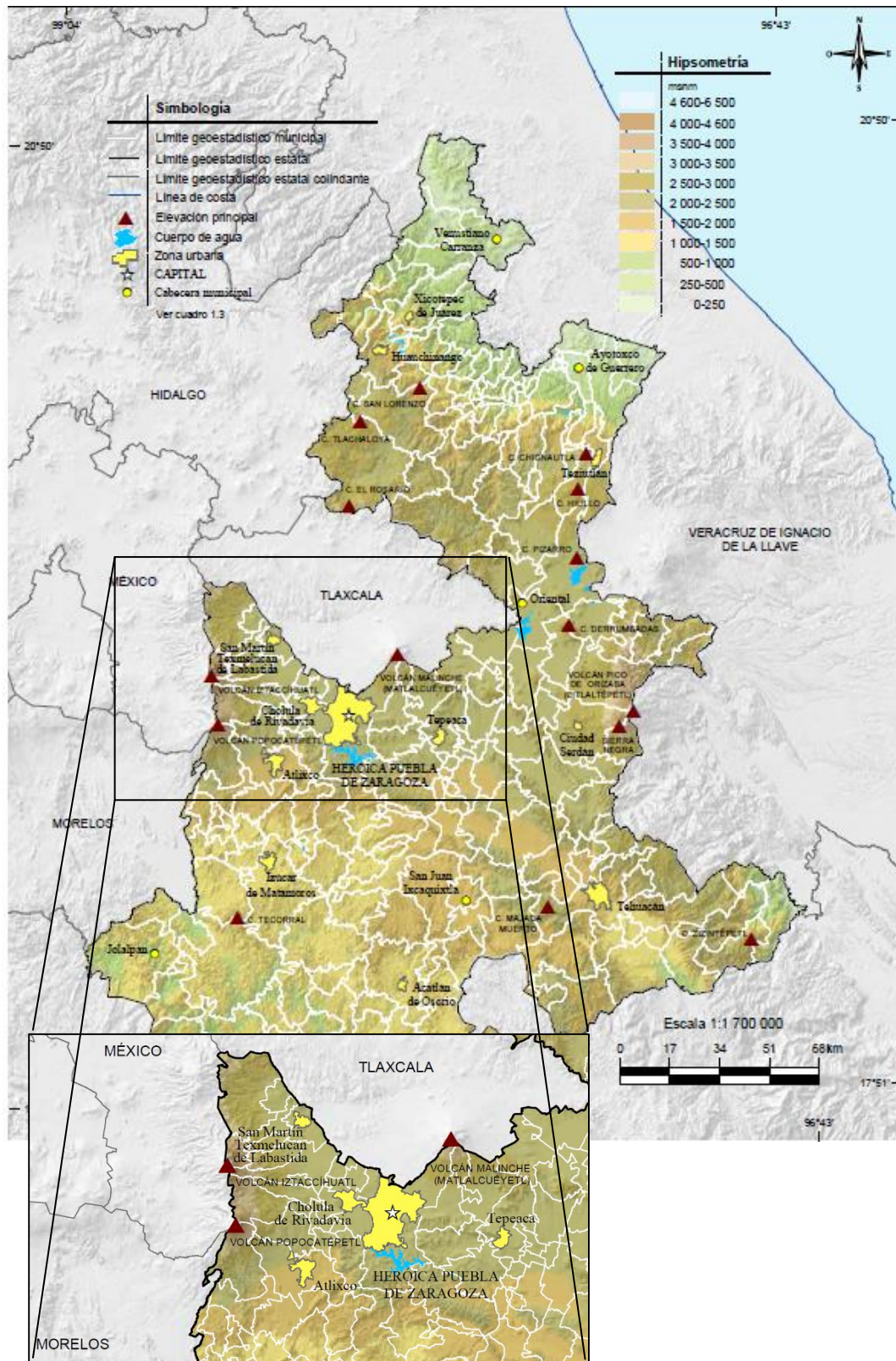


Figura 6. Orografía del Estado de Puebla (INEGI, 2015).

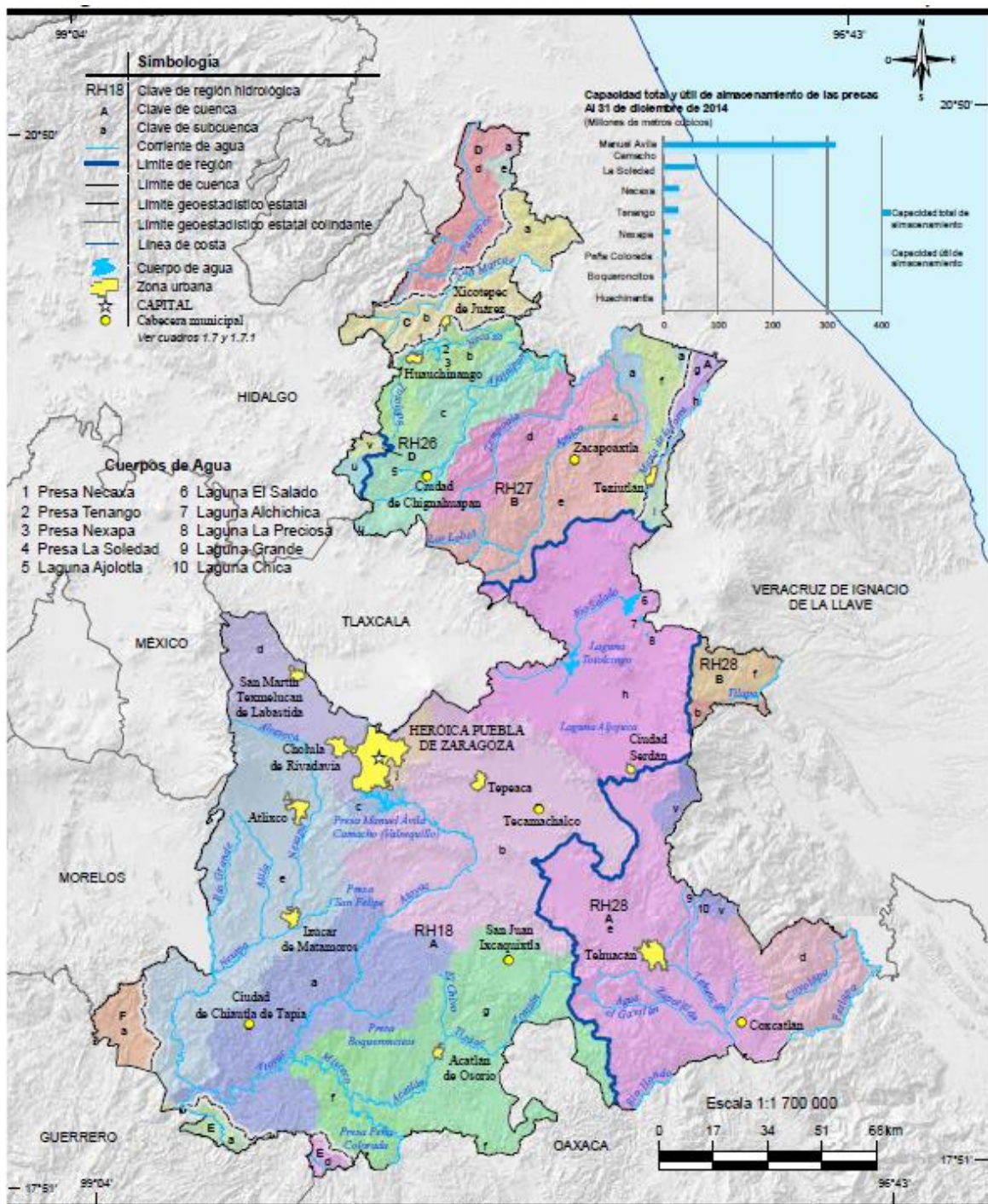


Figura 7. Hidrografía del estado de Puebla. (INEGI – CONAGUA, 2007).

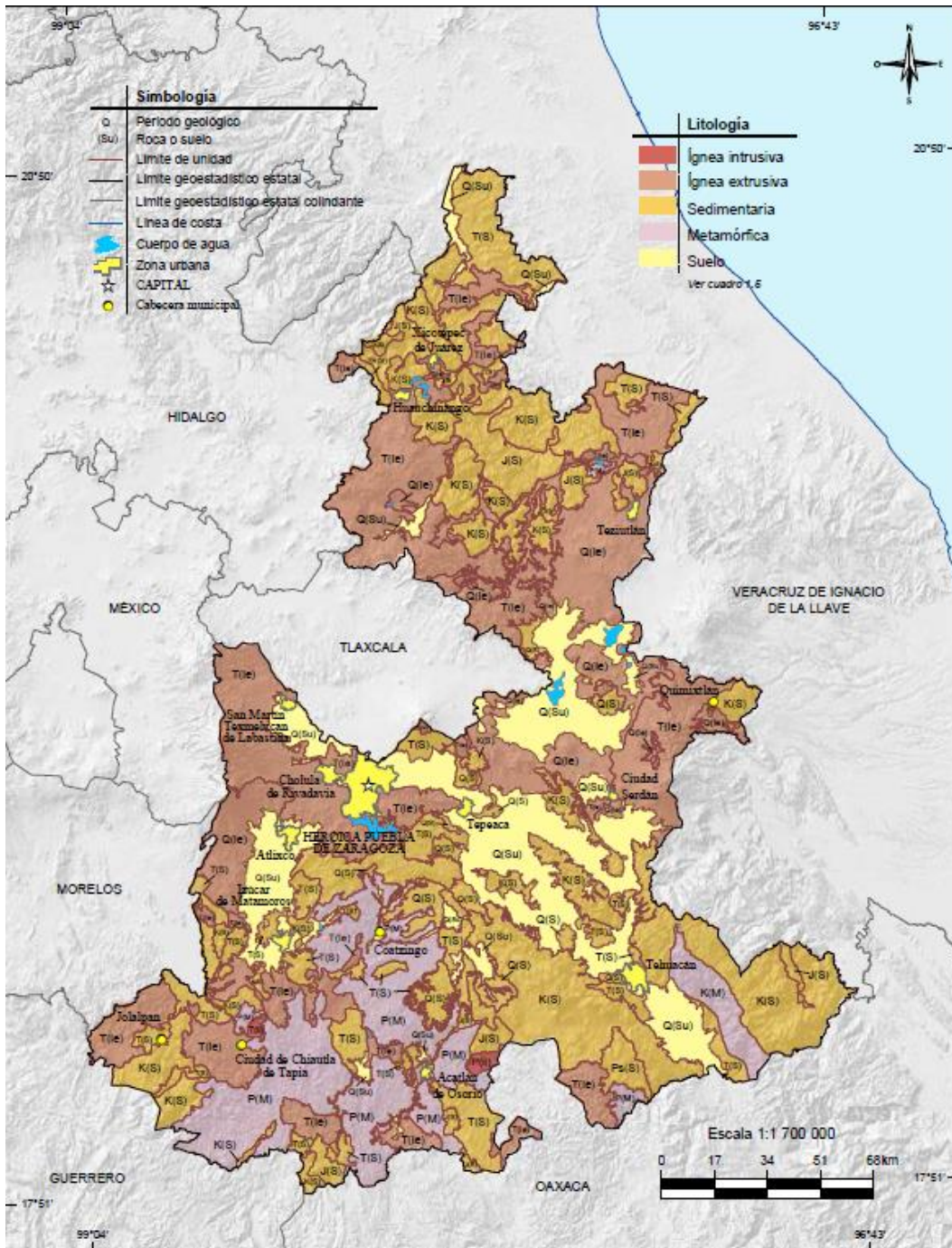


Figura 8. Geología del estado de Puebla (INEGI, 2015).



Figura 9. Fallas geológicas regionales (Azomoza, et al, 1998).

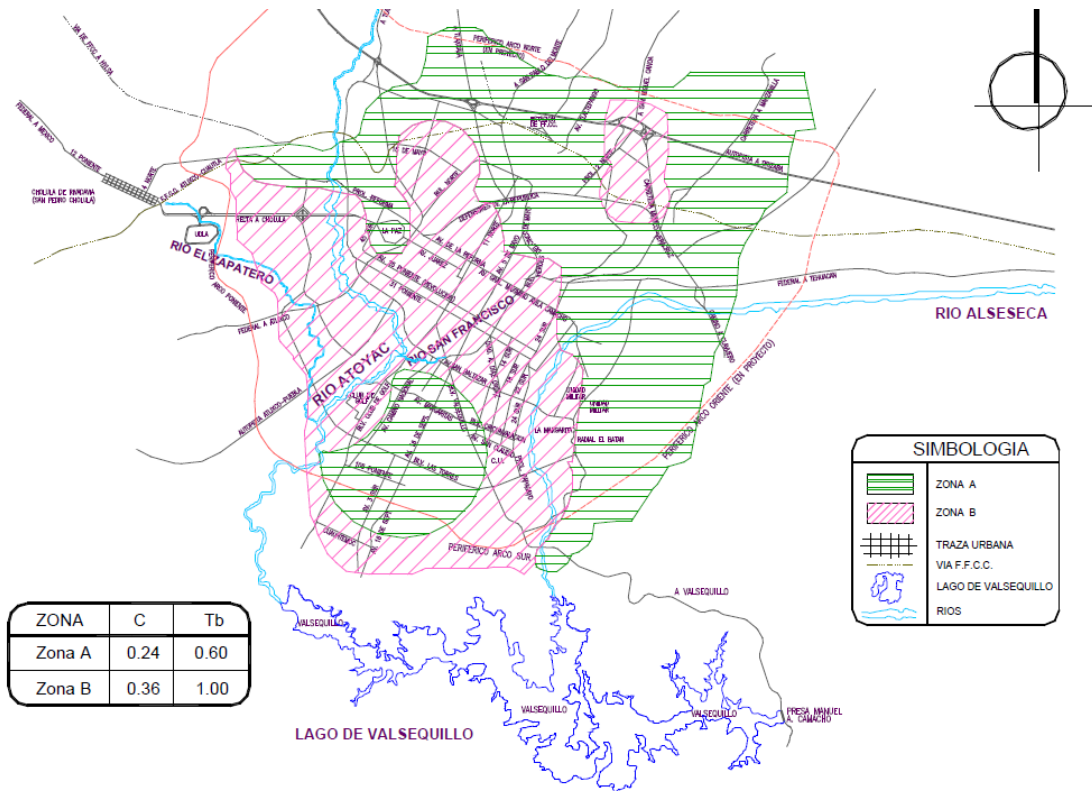


Figura 10. Propuesta de zonificación sísmica (Ruíz, 1993).

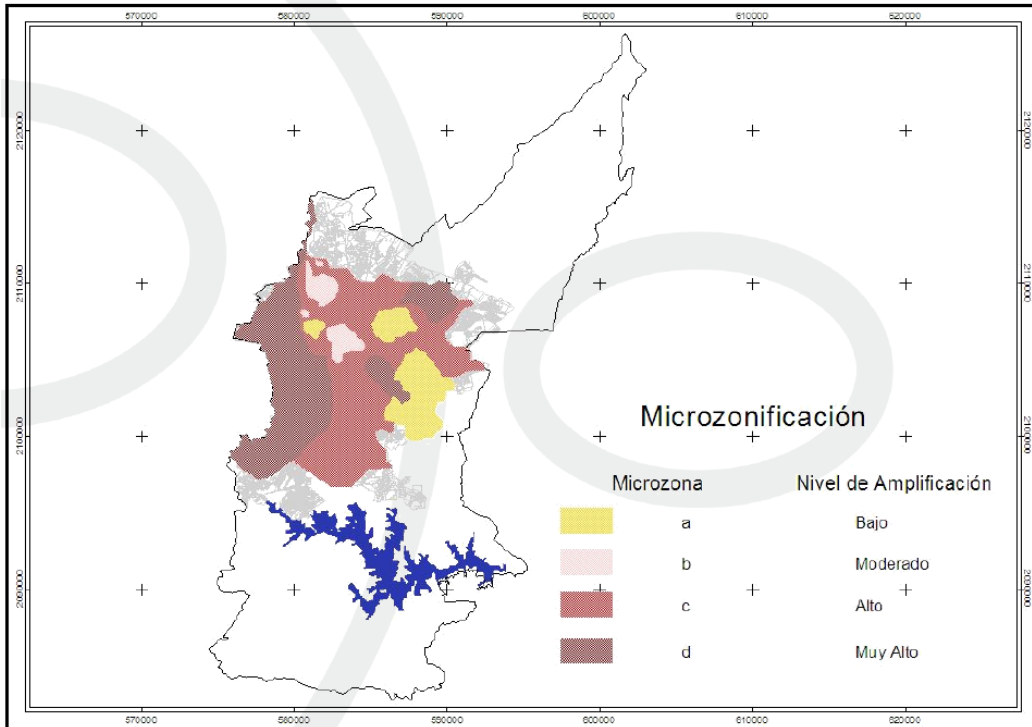


Figura 11. Microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla (modificado de Chávez-García, et al., 1995).



Figura 12. Límites territoriales entre Puebla y San Andrés Cholula (Congreso del Estado, 2013).

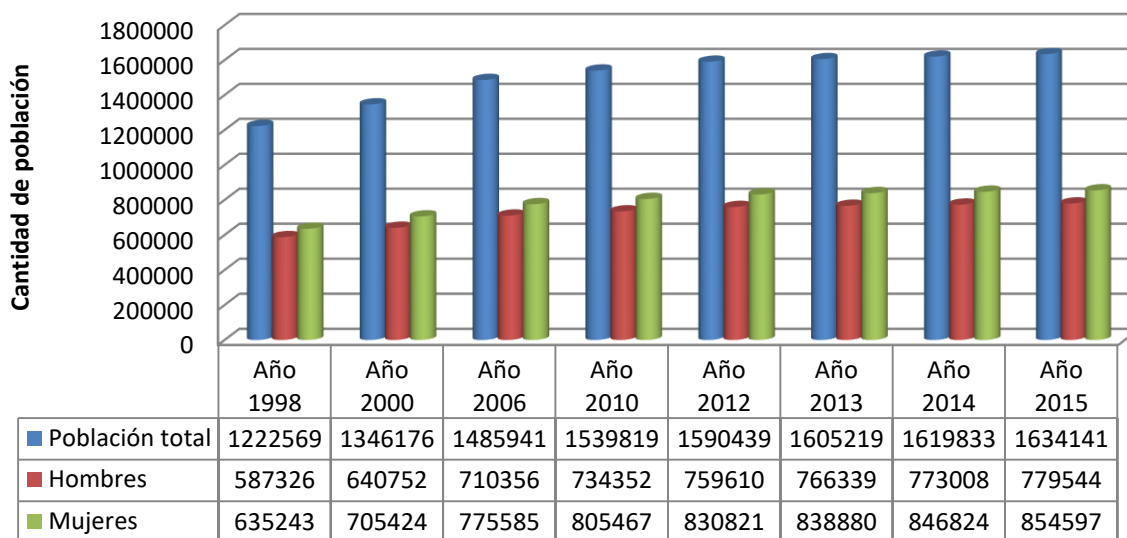


Figura 13. Población total en el municipio de Puebla 1998 – 2015, (INEGI, 2015).

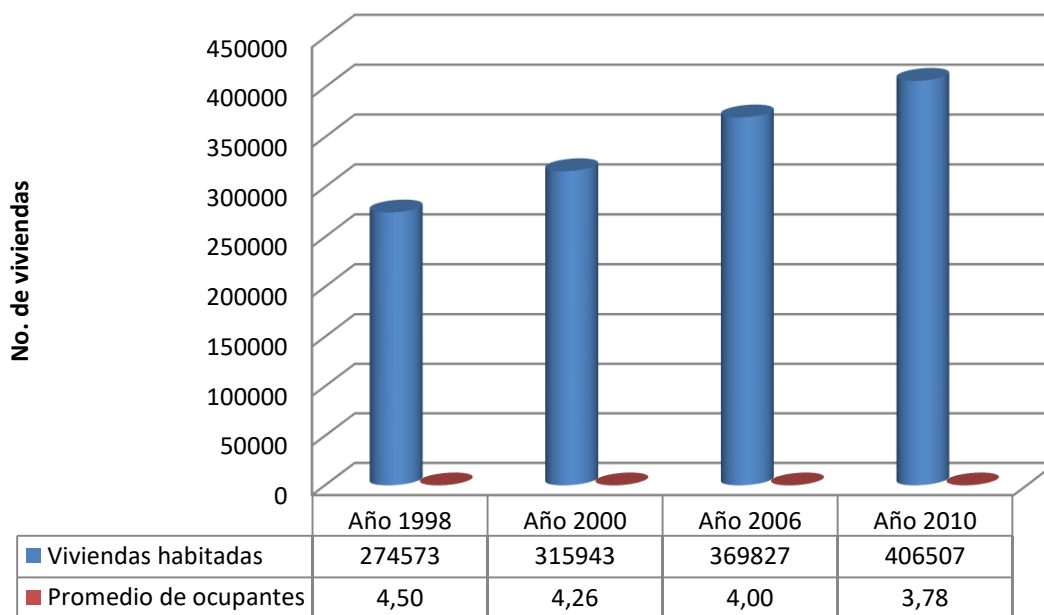


Figura 14. Número de viviendas en el municipio de Puebla de 1998 a 2010 (INEGI, 2015).

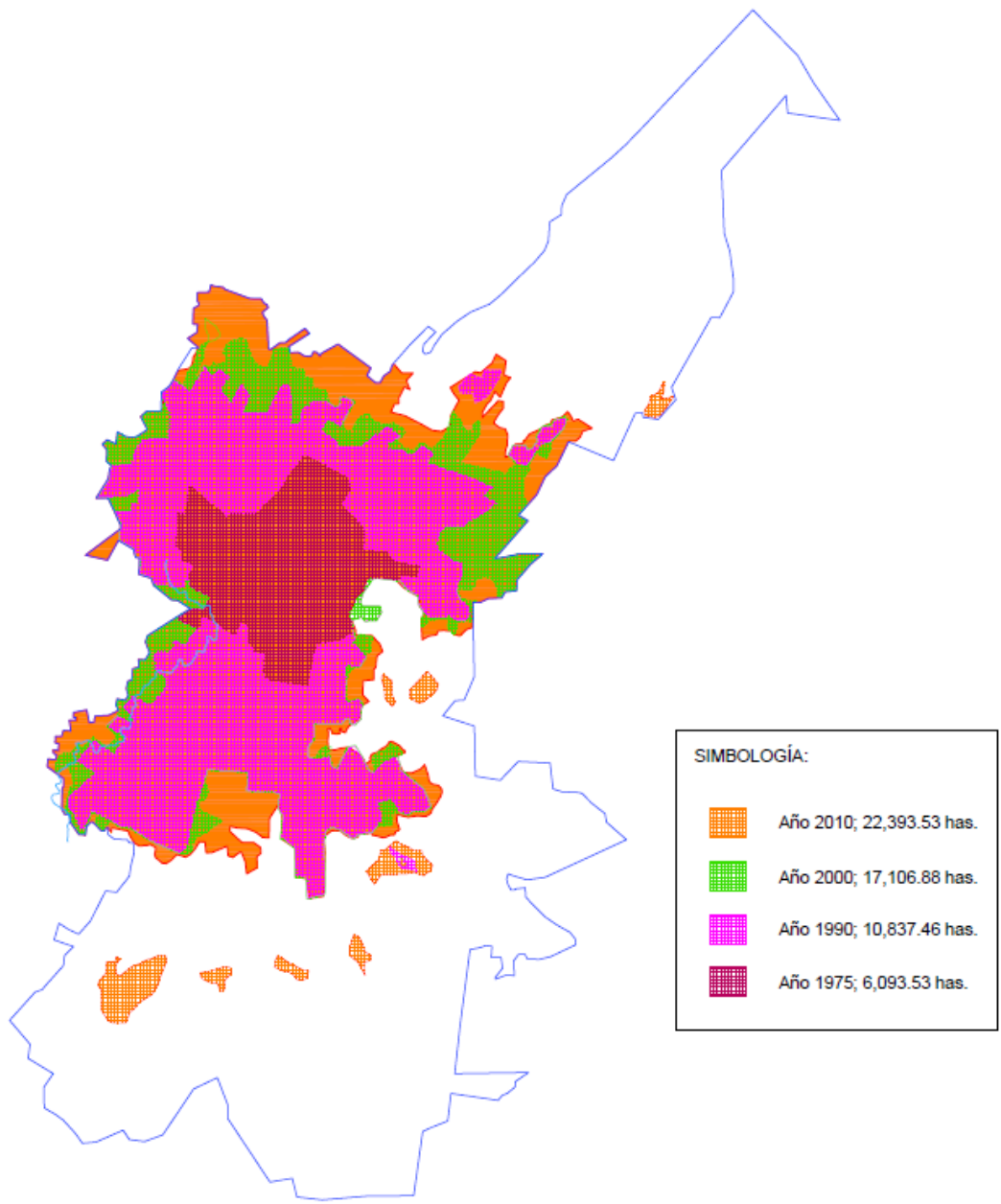


Figura 15. Tendencia de expansión y asentamiento urbano en el municipio de Puebla. Fuente: elaboración propia con información del Plan de desarrollo municipal, 2014-2018.

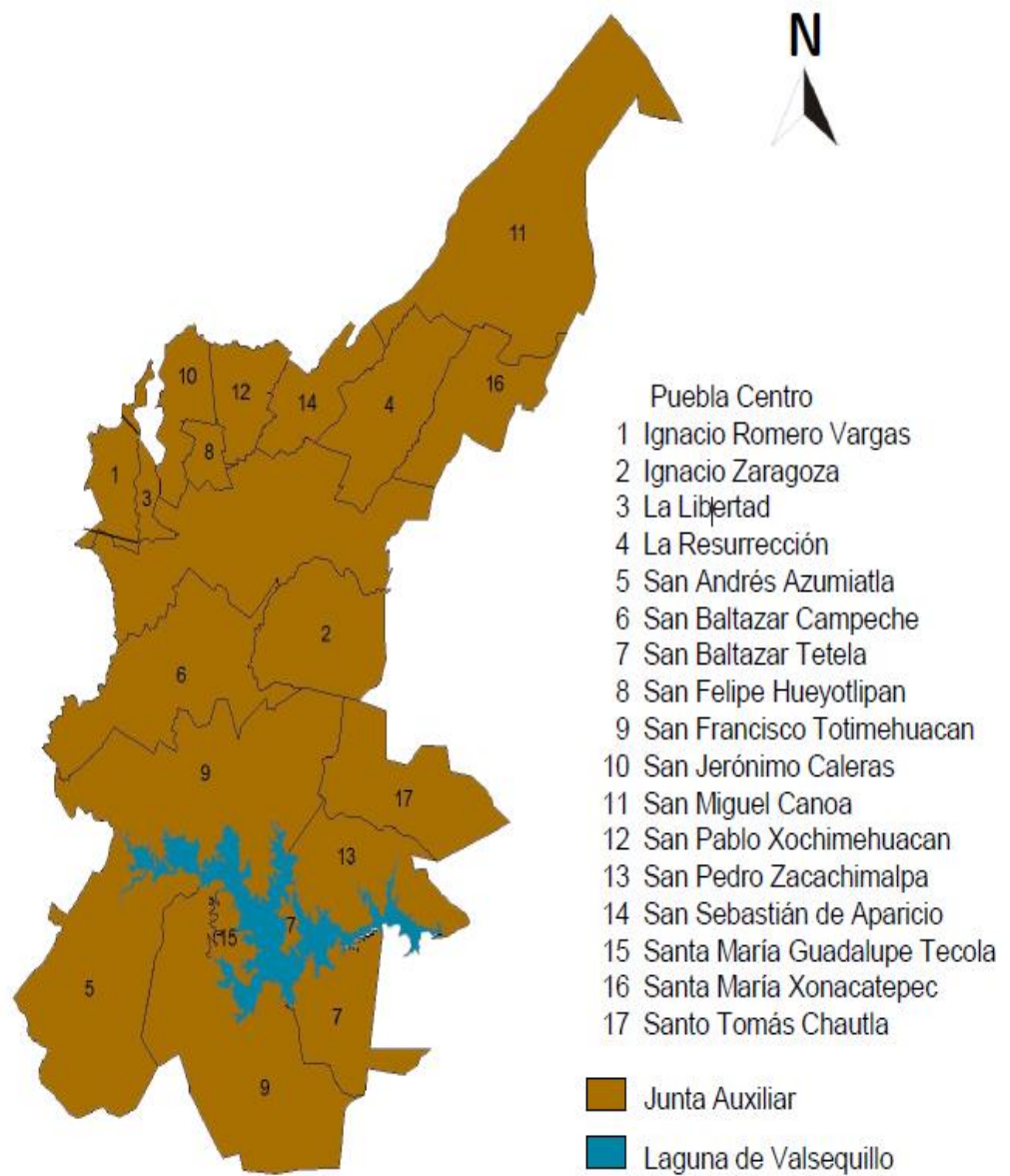


Figura 16. Juntas auxiliares (INEGI, 2010).

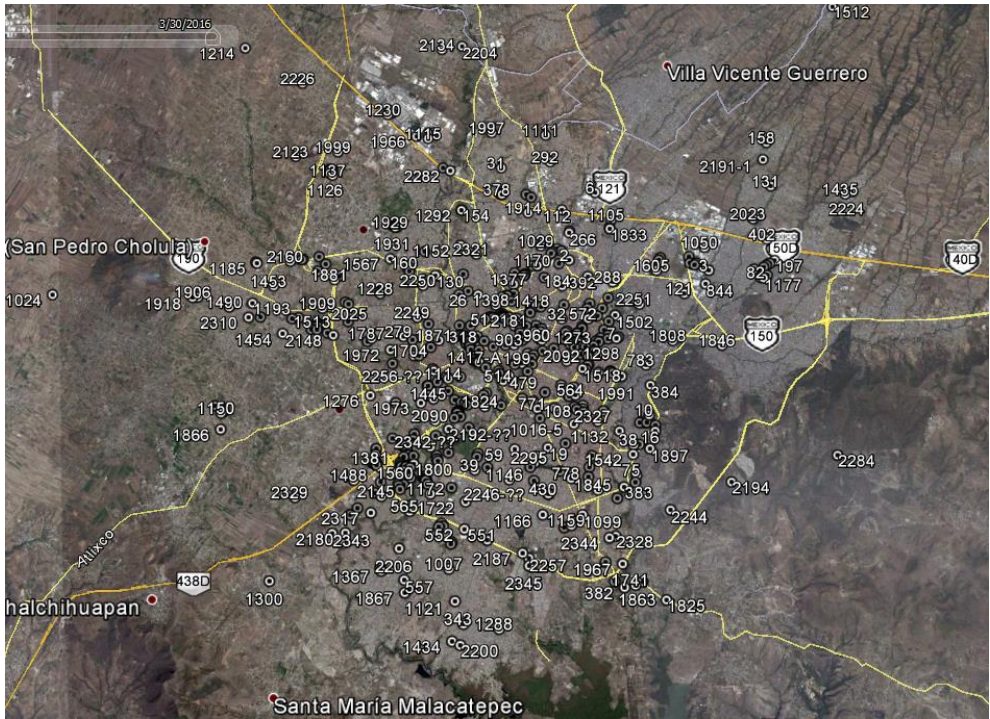


Figura 17. Ubicación de los estudios realizados por la empresa ICD en el valle de la ciudad de Puebla.
 Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).

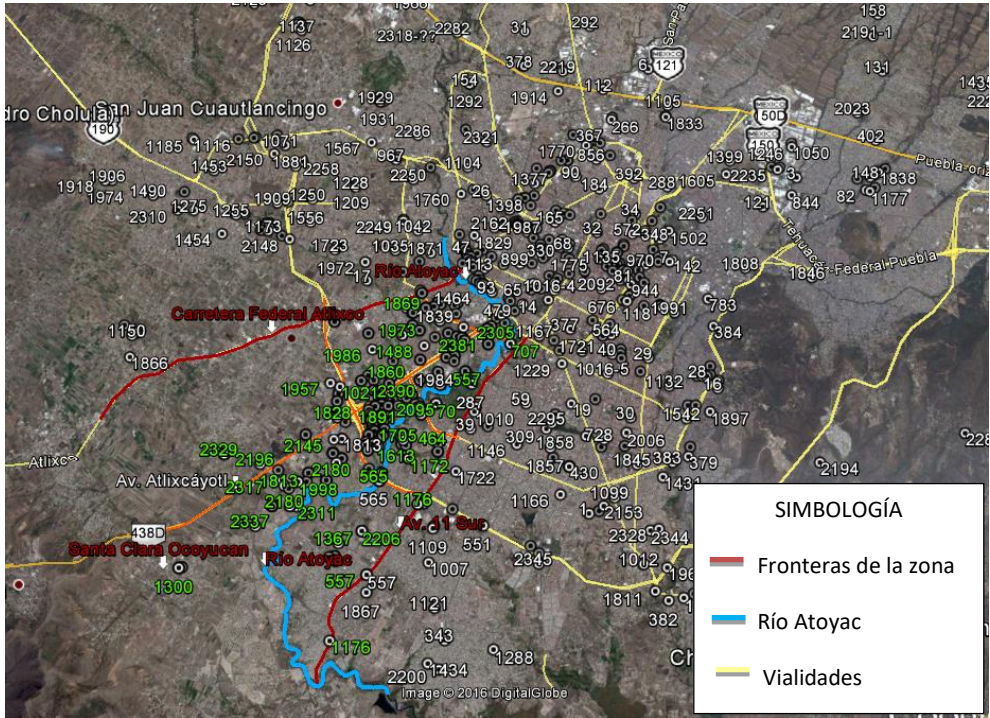


Figura 18. Fronteras de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).

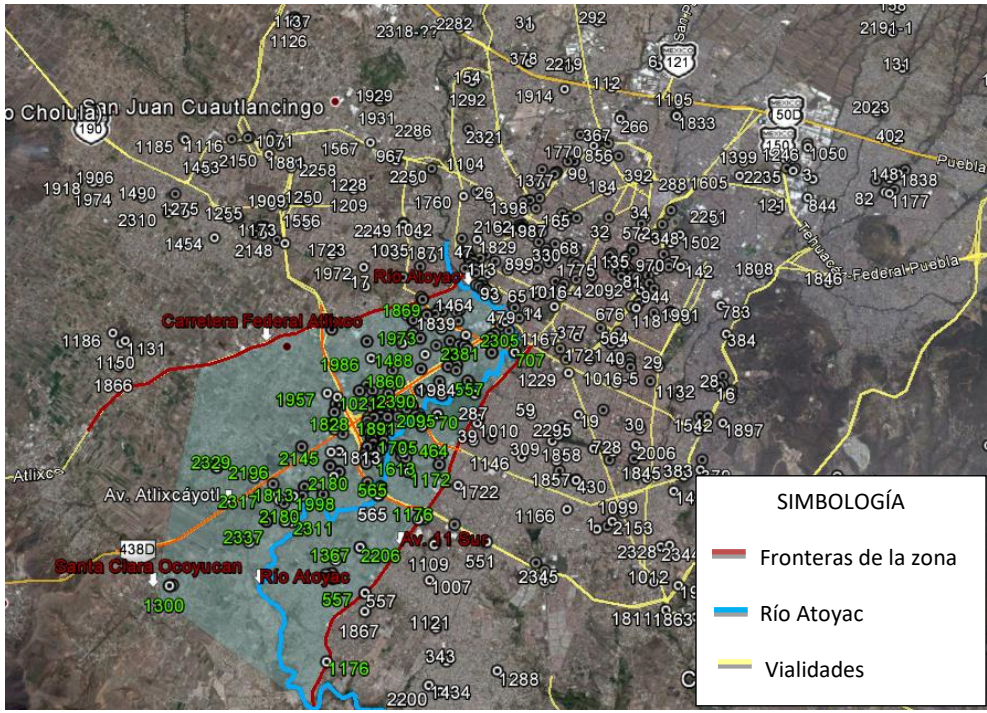


Figura 19. Área de estudio (48.28 km²). Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016).

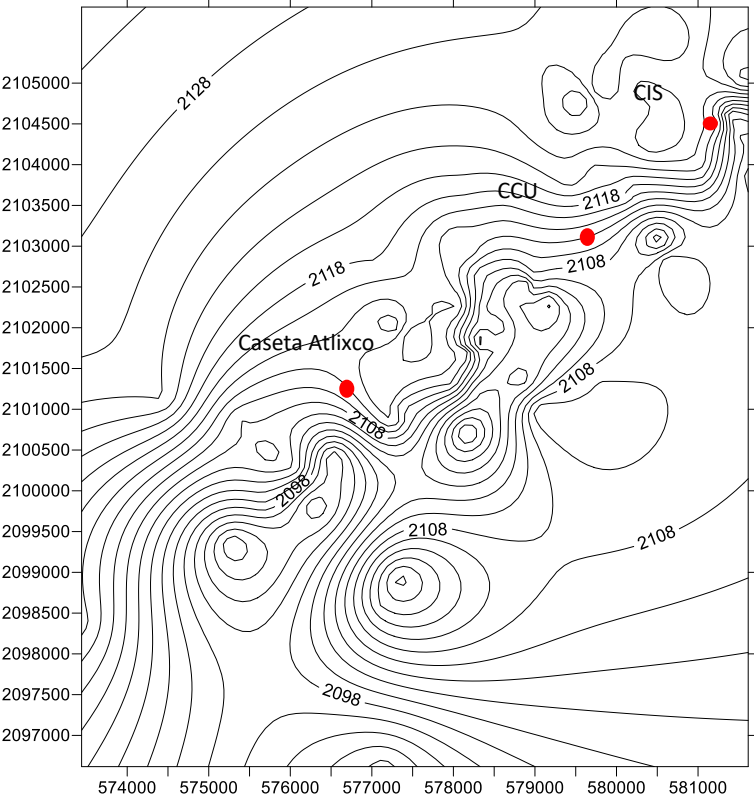


Figura 20. Curvas de nivel del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

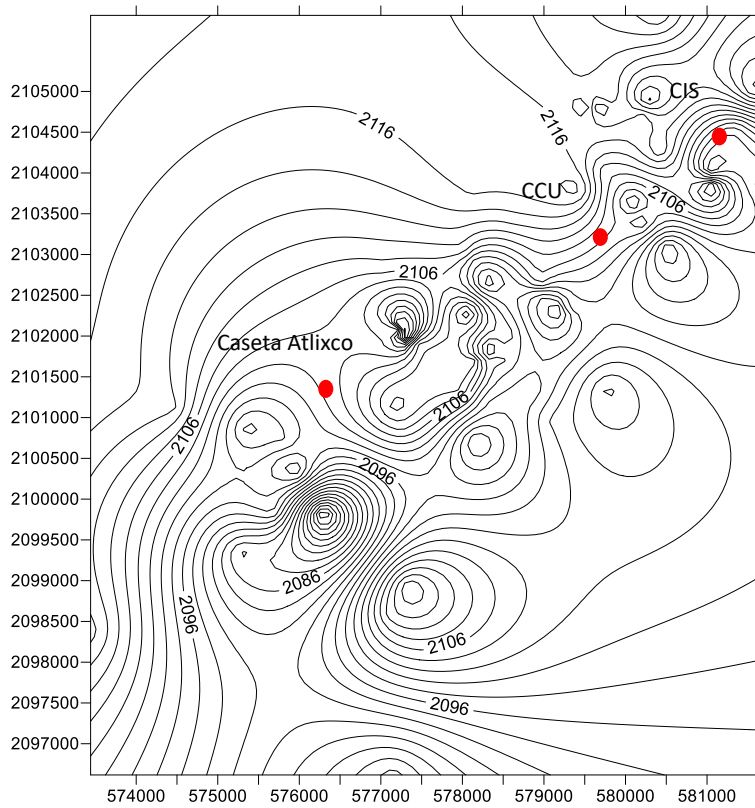


Figura 21. Curvas de nivel de las arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

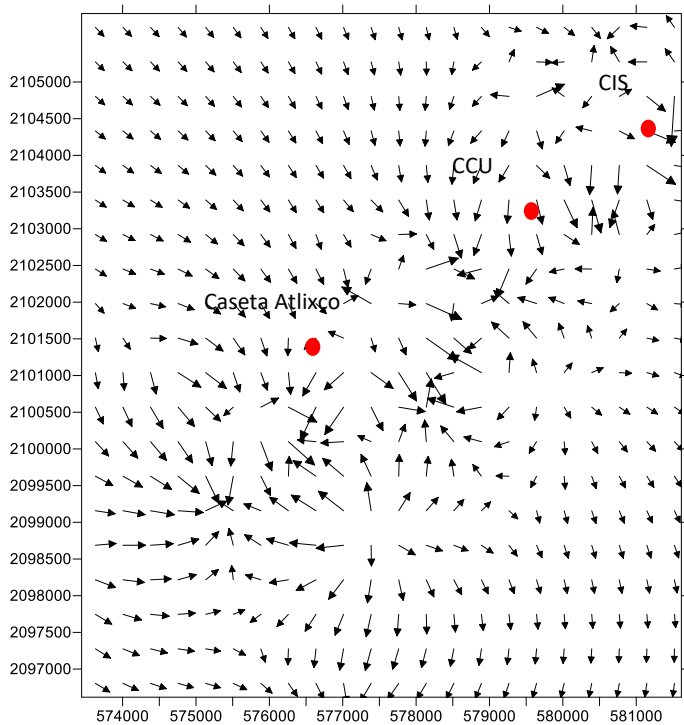


Figura 22. Representación por medio de vectores de las curvas de nivel del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

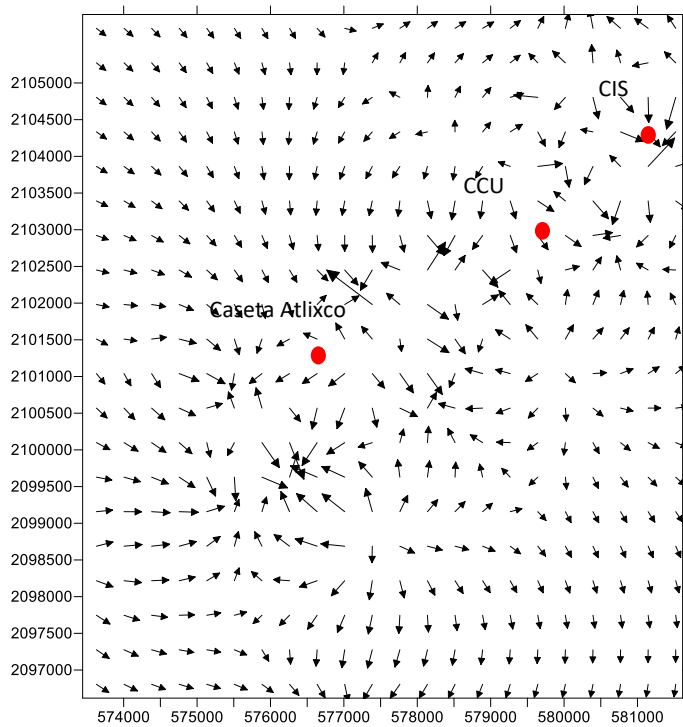


Figura 23. Representación por medio de vectores de las curvas de nivel de arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

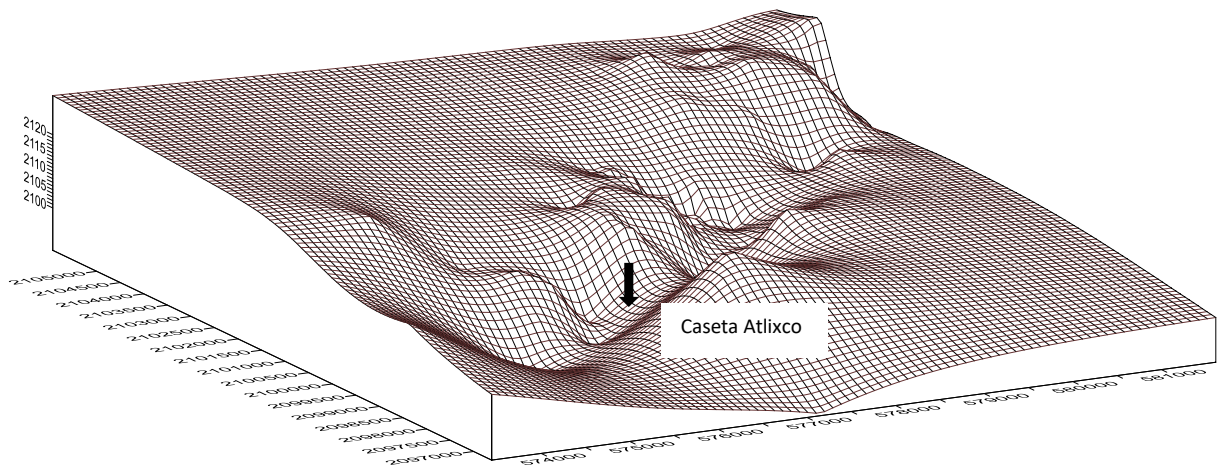


Figura 24. Representación en 3D del terreno natural. Fuente: elaboración propia en software Surfer.

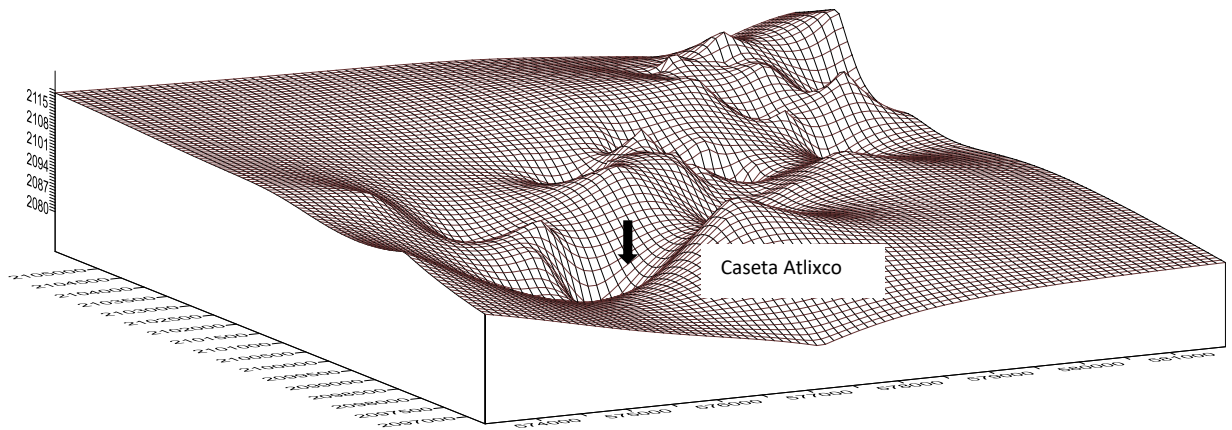


Figura 25. Representación del estrato de arcilla arenosa de alta y baja plasticidad (CH y CL). Fuente: elaboración propia en software Surfer.

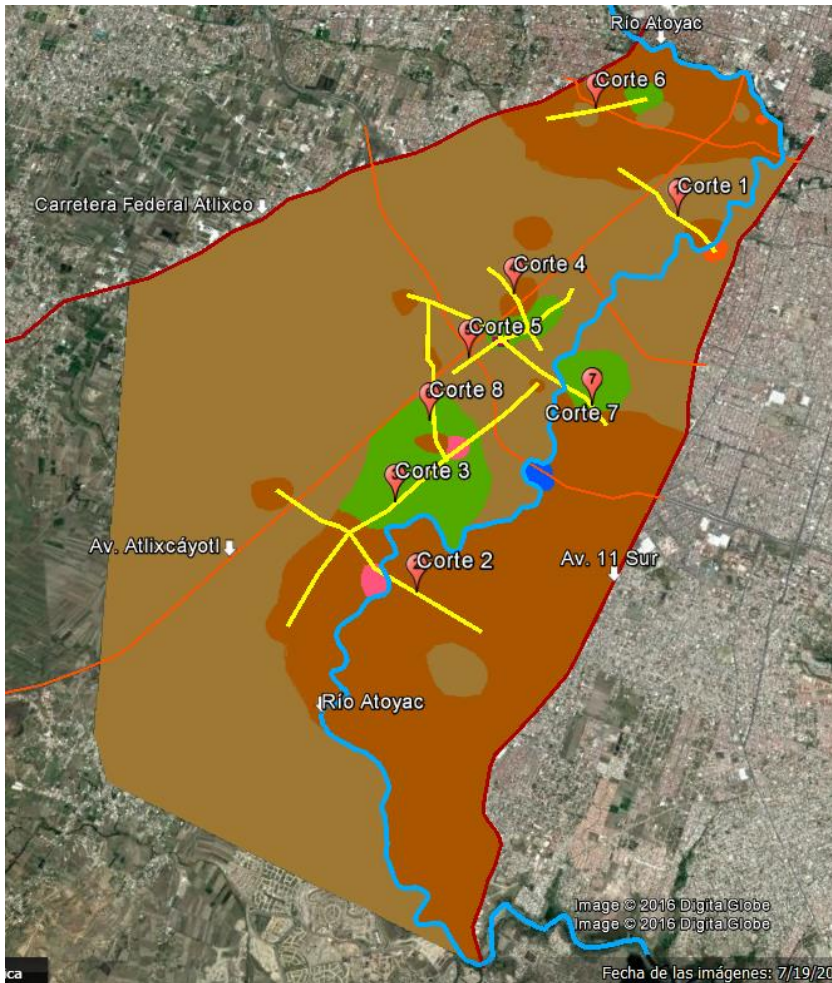


Figura 26. Cortes estratigráficos. Fuente: elaboración propia (Google Earth, 2016)

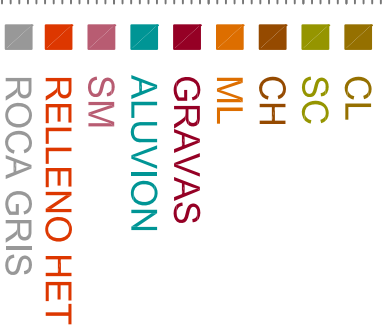
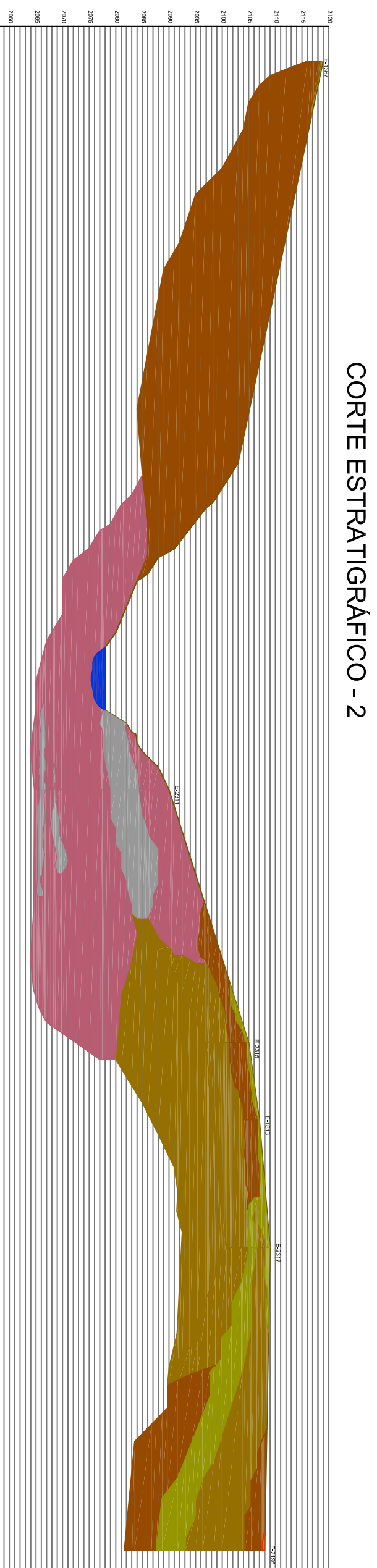
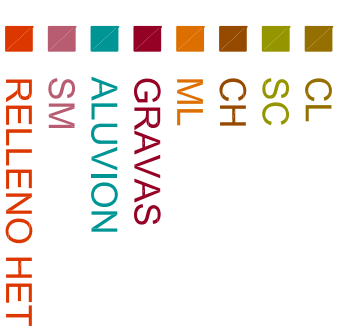
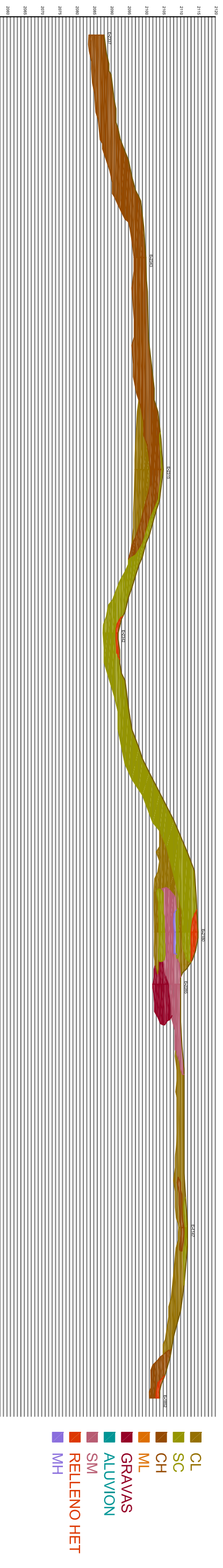


Figura 27. Cortes estratigráficos 1 y 2 (Sin escala). Fuente: Elaboración propia.

CORTE ESTRATIGRÁFICO - 3

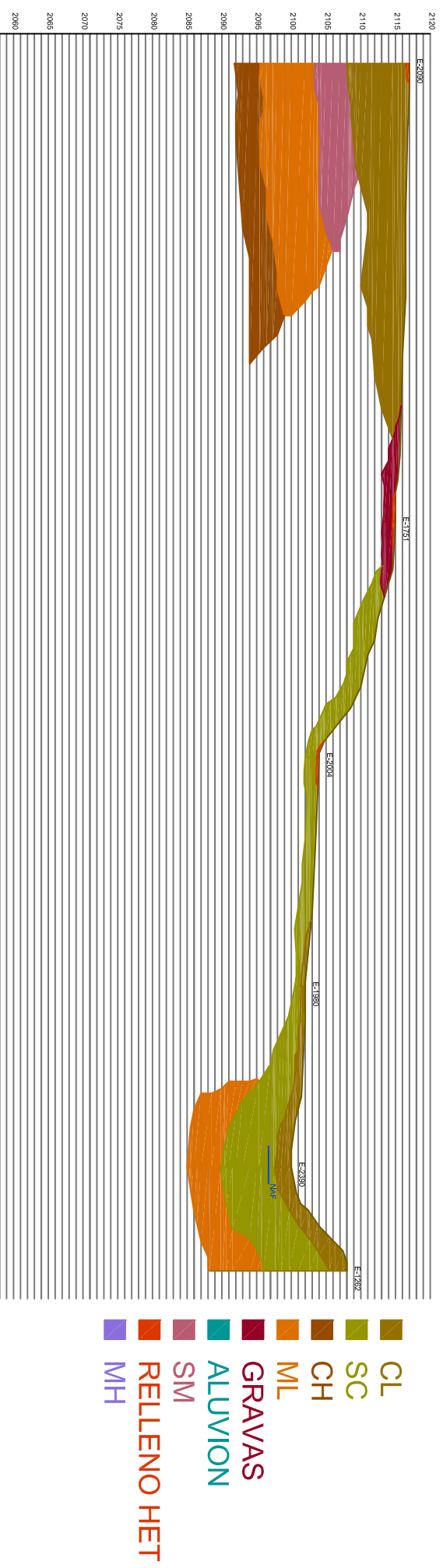


CORTE ESTRATIGRÁFICO - 4



Figura 28. Cortes estratigráficos 3 y 4 (Sin escala). Fuente: Elaboración propia.

CORTE ESTRATIGRÁFICO - 5



CORTE ESTRATIGRÁFICO - 6

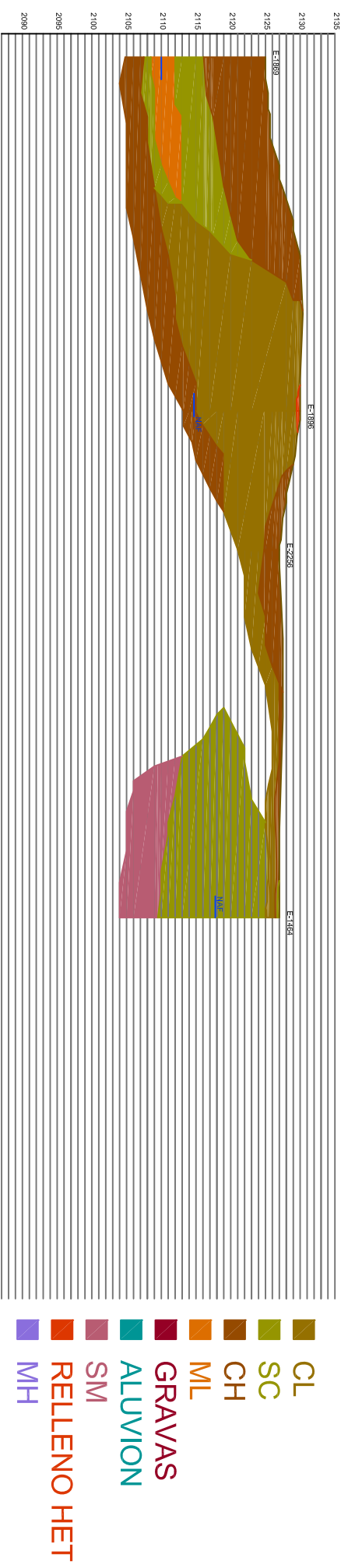
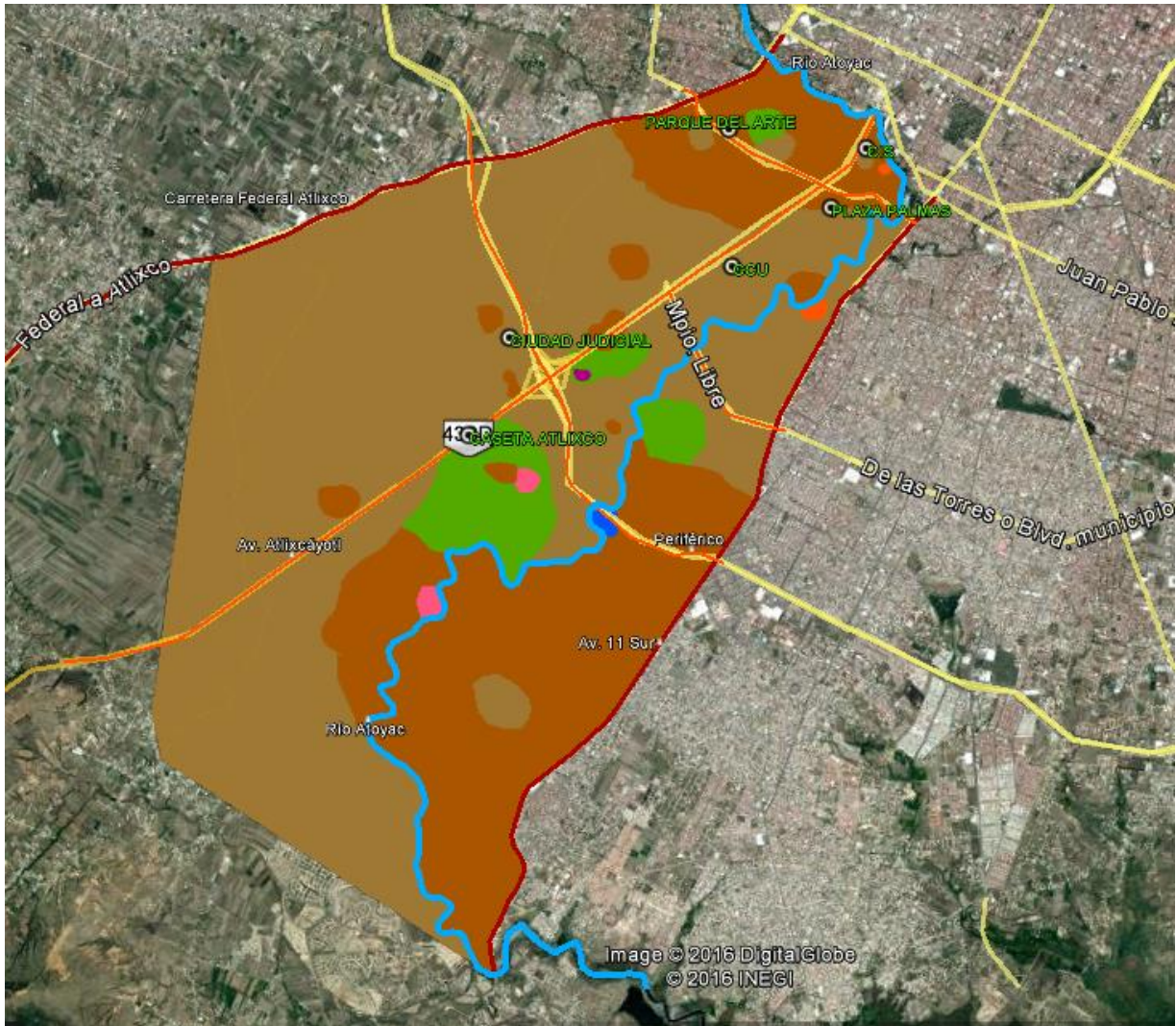


Figura 29. Cortes estratigráficos 5 y 6 (Sin escala). Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Cortes estratigráficos 7 y 8 (Sin escala). Fuente: Elaboración propia.



- Arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)
- Arcilla arenosa de alta plasticidad (CH)
- Arena arcillosa de baja plasticidad (SC)
- Limo arenoso de baja plasticidad (ML)
- Arena limosa (SM)
- Suelos aluviales
- Río Atoyac

Figura 31. Propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad de Puebla, representado en la aplicación Google Earth.

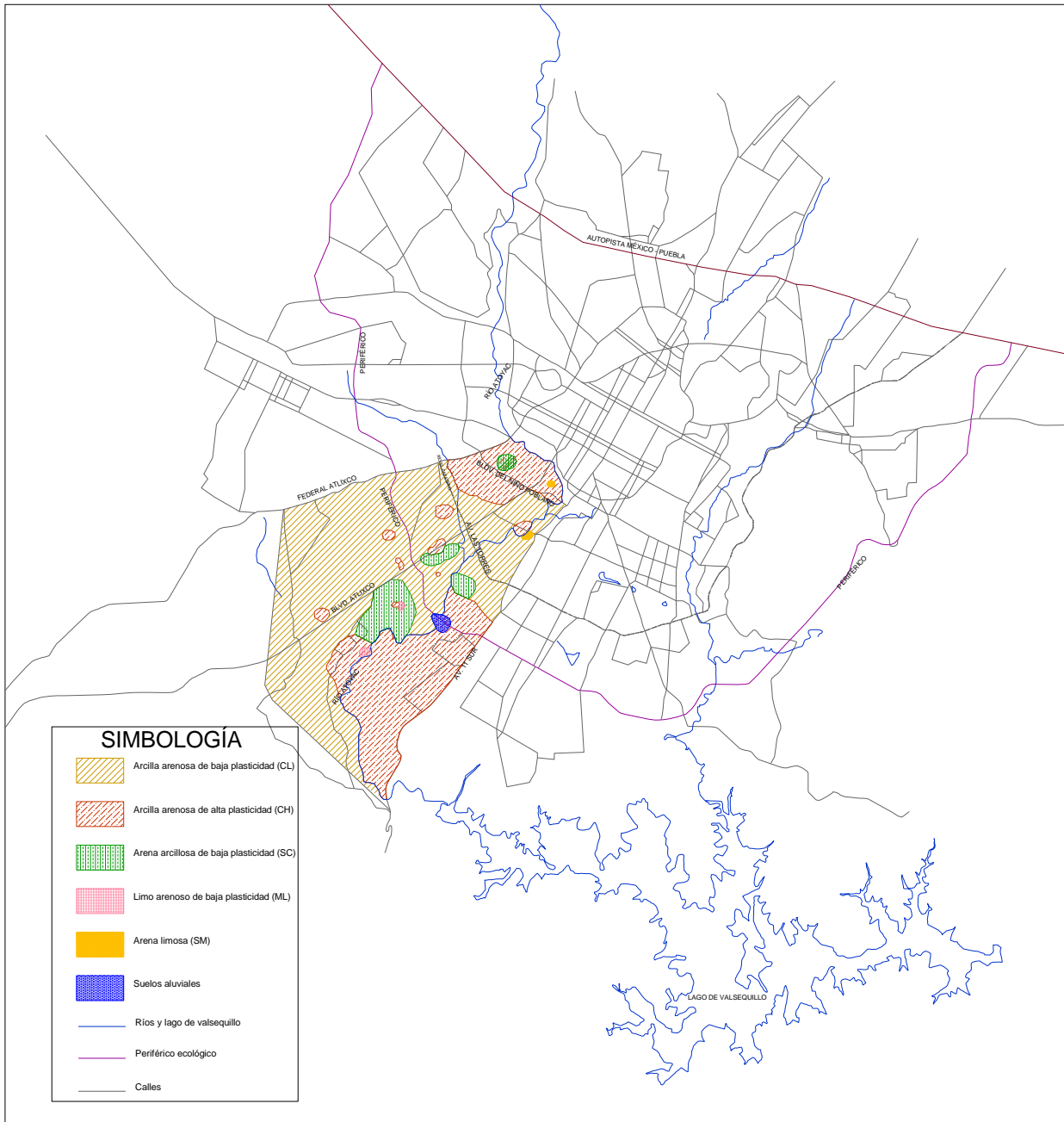


Figura 32. Propuesta de zonificación del área sur – poniente de la ciudad de Puebla. (Sin escala)

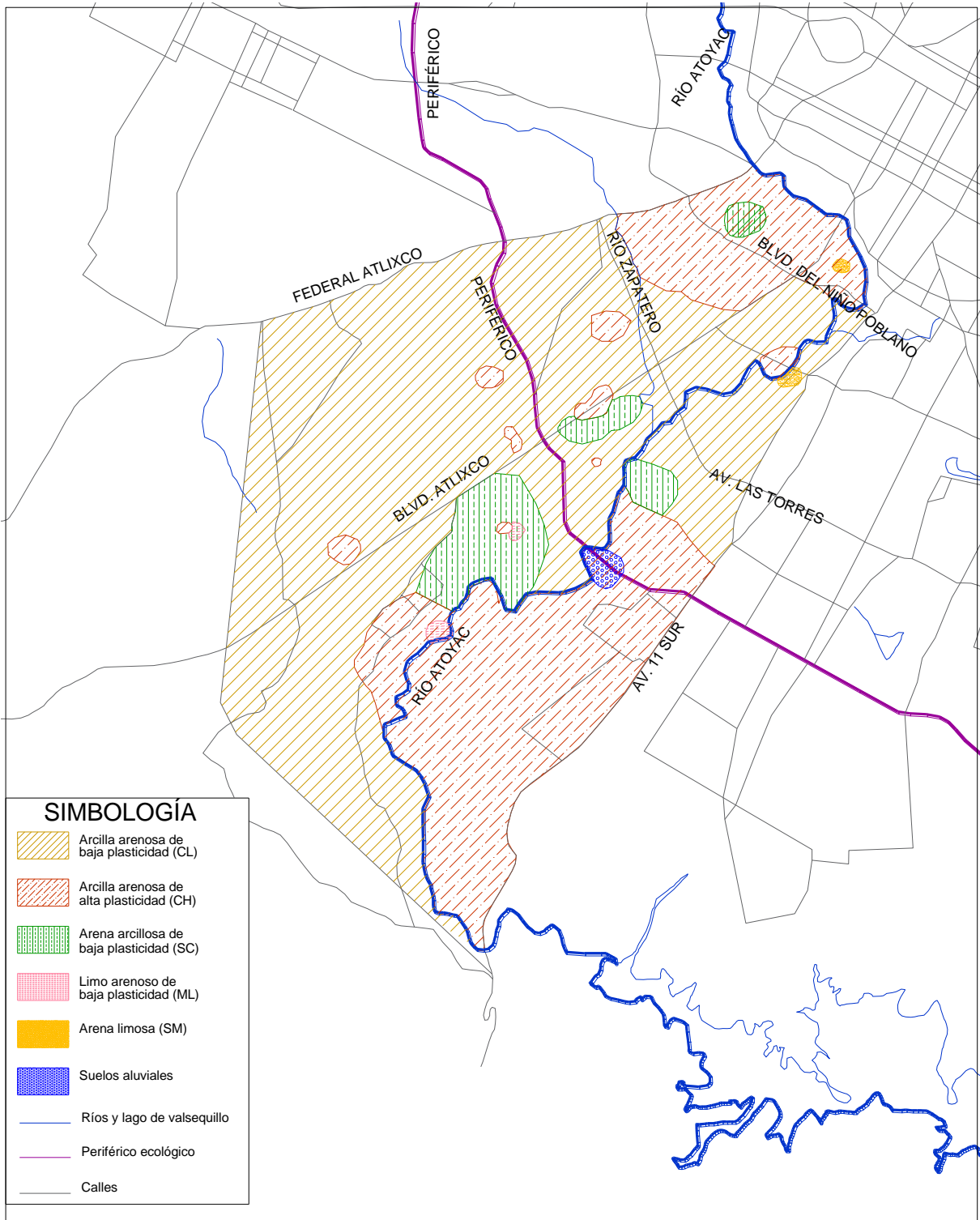


Figura 33. Zonificación geotécnica del área sur – poniente de la ciudad de Puebla.

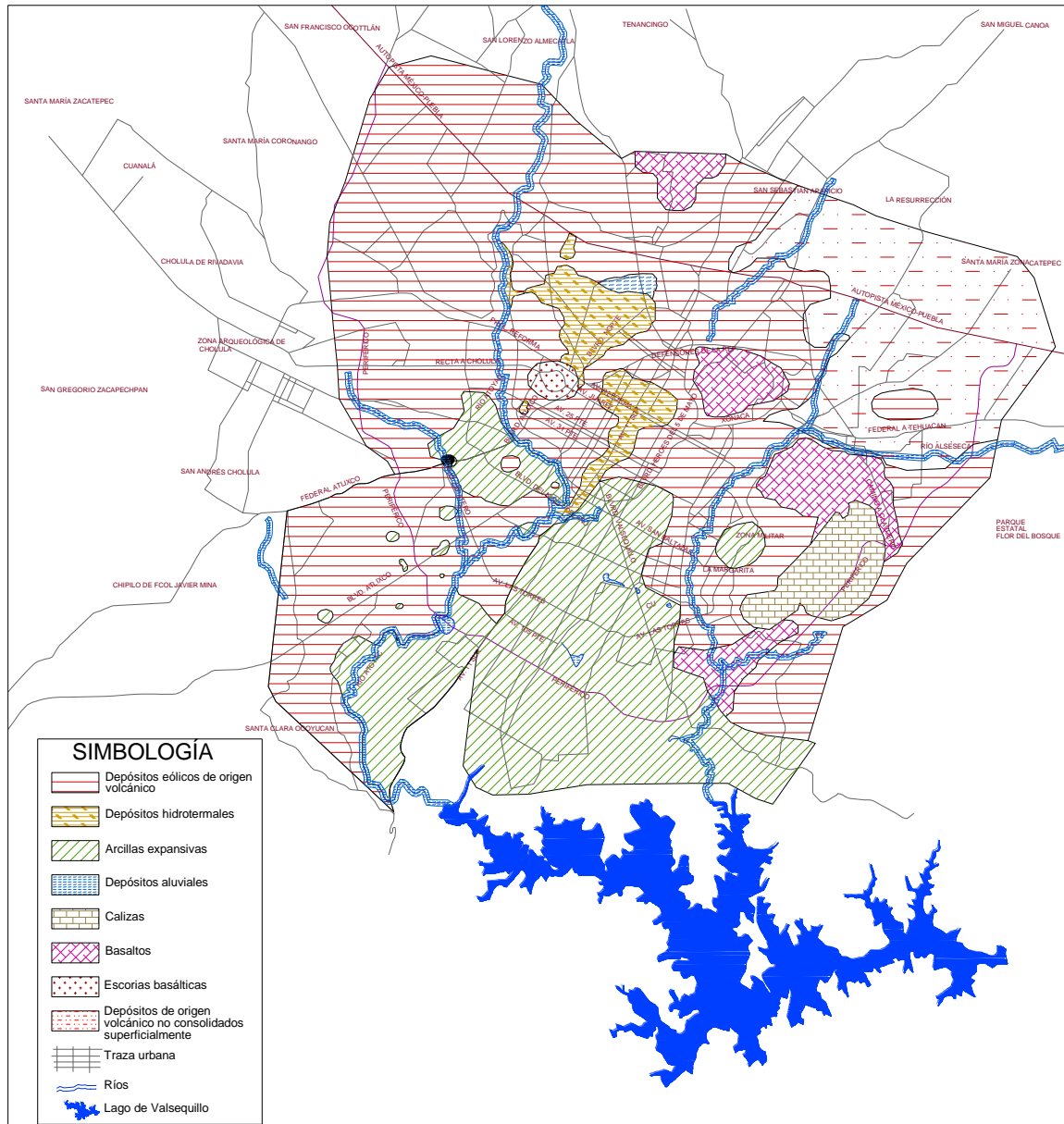


Figura 34. Carta de zonificación geotécnica para el área urbana del Valle de Puebla, 2016.

ANEXO. TABLAS

Cohesión	Tipo de suelo	Coefficiente sísmico	Suelo
$C < 2.5 \text{ ton/m}^2$	Tipo III	0.48	Blando
$2.5 \text{ ton/m}^2 > C < 10 \text{ ton/m}^2$	Tipo II	0.32	Intermedio
$C > 10 \text{ ton/m}^2$	Tipo I	0.30	Muy duro

Tabla 1. Correlación cohesión –tipo de suelo – coeficiente sísmico. Fuente: Reglamento de construcción de la ciudad de Puebla

Tipos de vivienda	Número de viviendas habitadas	%
Total de viviendas habitadas	406,507	100.00
Vivienda particular	406,408	99.98
Casa	307,213	75.57
Departamento en edificio	60,684	14.93
Vivienda o cuarto en vecindad	23,449	5.77
Vivienda o cuarto en azotea	317	0.08
Local no construido para habitación	119	0.03
Vivienda móvil	34	0.01
Refugio	30	0.01
No especificado	14,562	3.58
Vivienda colectiva	99	0.02

Tabla 2. Tipos y número de viviendas habitadas en el municipio de Puebla al año 2010, (INEGI, 2015).

Años	Hectáreas	Población (Hab.)	Densidad de Población hab./ha.
1970	2,282.81	532,744	233.37
1975	6,093.53	684,251	112.29
1990	10,837.46	1,007,170	92.93
2000	17,106.88	1,271,673	74.34
2005	20,431.86	1,485,941	72.72
2010	22,393.53	1,539,819	68.76

Tabla 3. Crecimiento urbano del municipio de Puebla (Plan de desarrollo municipal, 2014-2018).

