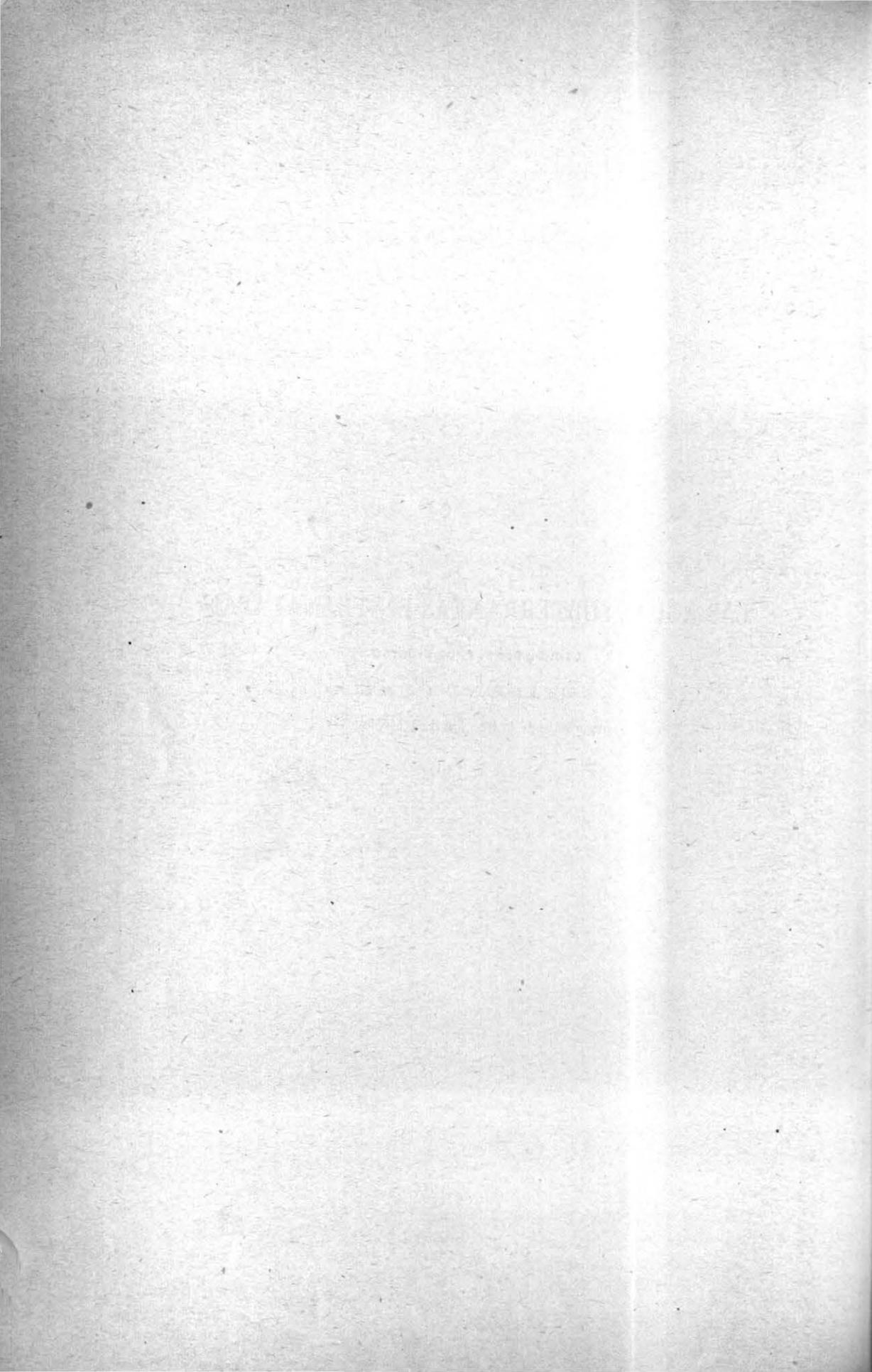


LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN TLANALAPAN

DTO. DE APAN, E. DE HIDALGO

POR HERIBERTO CAMACHO

(Ayudante de la Sección de Hidrología)



LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN TLANALAPAN, DTO. DE APAN, E. DE HIDALGO

Por Heriberto Gamacho. (Ayudante de la Sección de Hidrología.)

INTRODUCCION

En los primeros días de enero del presente año, tuve el honor de ser comisionado por el señor Director del Instituto Geológico Nacional, para hacer un estudio hidrológico en la Municipalidad de Tlanalapan, del Distrito de Apan, en el Estado de Hidalgo, con el fin de proponer las obras de captación de aguas potables para abastecer a la Cabecera de la Municipalidad, que carece de ellas, para sus usos más necesarios. Desde luego comprendí que la tarea era muy superior a mis fuerzas; y he desarrollado el presente trabajo convencido de que, además de sus grandes deficiencias y errores, nada enseñará a los que se han especializado en la hidrología subterránea, produciendo trabajos tan interesantes como detallados; y algunos de ellos de estilo didáctico, en la técnica difícil de la hidrología. Deseo que las conclusiones que llego a establecer, sin estar en contradicción con teorías admitidas anteriormente, sean una consecuencia lógica de los hechos observados en el terreno. En mi trabajo procuraré desarrollar, en lo general, el programa propuesto por el señor Director del Instituto, con algunas adiciones del señor ingeniero Vicente Gálvez, Jefe de la Sección de Hidrología en el mismo Instituto; pero quizá me separe algo del programa mencionado, en virtud de las necesidades del mismo trabajo.

Hago públicos mis agradecimientos a

las autoridades y vecinos de Tlanalapan y a los señores Manuel Olivier, Vicente Godínez y Carlos Velasco, por sus bondades para facilitar el desarrollo de los itinerarios.

Finalmente, advertiré que al tratar el difícil capítulo de geología, no me he conformado con las observaciones del campo; he recurrido a la consulta de los mejores autores, cuyas obras cito oportunamente en el discurso, haciendo las llamadas correspondientes por medio de números entre paréntesis; y a decir verdad, no he procedido con el método del geólogo, eminentemente inductivo, no he generalizado, no: he aplicado deductivamente a mi caso particular, las leyes asentadas por notables geólogos que han estudiado la génesis de nuestra Mesa Central. Es preferible hacer una confesión honrada, a traducir, recopilar, repetir, hacer resúmenes o extractos de artículos y trabajos ajenos; en una palabra, *mutilar no es producir*, así se escriban sendos artículos cargados de planos, fotografías y croquis que honradamente no pueden calzarse con la firma del autor.

Datos geográficos

La zona estudiada es aproximadamente un cuadrilátero, cuyos lados no paralelos a las líneas geográficas principales, se cortan en los vértices: Tepeyahualco,

Alcantarillas, San Lorenzo y Ometusco. Los tres primeros puntos pertenecen al Distrito de Apan, el más austral de los que políticamente forman el Estado de Hidalgo; y el último, al Distrito de Otumba, del Estado de México. Es la región que goza de la mejor comunicación ferrocarrilera comparada con el resto del Estado de Hidalgo: está cruzada por los Ferrocarriles Mexicano, de México a Puebla y ramal de Ometusco a Pachuca, el Hidalgo y Nordeste, en su ramal de San Agustín a San Lorenzo, y el Interocéánico de México a Puebla, pasando por Calpulalpan; además de las vías de propiedad particular de las haciendas de S. Antonio, Tlalayote y Tepechichilco, que unen esas fincas con otras y con las estaciones de Irolo, Apan y Tlanalapan, respectivamente. Dentro de este cuadrilátero que tiene una superficie aproximada de 328 kilómetros cuadrados, se encuentra la Municipalidad de Tlanalapan, cuya cabecera cuenta con 1,000 habitantes. Se halla situada a 2,380 metros sobre el nivel del mar, en la falda occidental de un cerrito basáltico de poca altura y a muy corta distancia de la estación de su nombre, sobre la vía del Ferrocarril Hidalgo (ramal de San Lorenzo); sus coordenadas geográficas son: 19° 49' de latitud Norte y 0° 32' de longitud E. de México.

Dentro de la misma zona se encuentra el pueblo de Tepeapulco, también Cabecera de municipalidad, como 6 kilómetros al SE. de Tlanalapan, edificado en el plano inclinado que forma la vertiente septentrional del Cerro de Cópore. Tepeapulco cuenta con mayor población que Tlanalapan, pero no está tan bien comunicado como esta población; siendo el escape de San Isidro, sobre el Ferrocarril Hidalgo, la estación más próxima.

La población más importante dentro del perímetro alcanzado por los itinerarios, es Apan, Cabecera del Distrito, situada al SE. de las poblaciones antes mencionadas, muy próxima a la estación del mismo nombre, sobre el Ferrocarril Mexicano; tiene por coordenadas geográficas 19° 42' 47" de longitud Norte y 0°

40' 43" de longitud E. de México; se encuentra a 2,480 metros sobre el nivel del mar, y cuenta con una población de 3,000 habitantes. El clima de la región puede llamarse frío, el propio de la Mesa Central mexicana; la vida es netamente agrícola, siendo el maguey la planta predilecta, y la fabricación del pulque, la que deja las mejores rentas al Distrito de Apan.

Fisiografía

Tlanalapan.—Está en un plano ligeramente inclinado y de dirección EW., con una anchura media de 5 kilómetros, y que constituye la parte más baja del valle secundario que vamos a describir. Este valle pertenece a la gran Mesa Central mexicana e hidrográficamente a la Cuenca del Valle de México; es una rinconada de dicha cuenca, que participa en pequeño del carácter general que afecta a la altiplanicie central vista desde la cumbre del Xihuingo, aparato volcánico rhyolítico que se eleva a 730 metros sobre Tlanalapan, o sea a 3,110 metros sobre el nivel del mar; este carácter es el de la dilatada llanura, que se ve interrumpida por lomas y lomeríos de formas arredondadas y de diversos tamaños, figurando islotes diseminados en el fondo plano. Las unidades montañosas y eminencias que desde este observatorio aparecen más notables, son: por el Norte y NW.: la sierra de Las Navajas y los Organos de Actopan, que limitan el horizonte con sus enhiestos perfiles. Al NW., pero muy cerca y sobre la mesa, el cerro de Tecajete, que parece establecer un *trait d'union* del relieve entre la sierra de Las Navajas y la de Los Pitos, que a grande altura se destaca al W., con una dirección aproximada de NS.; en su extremo austral se interrumpe el alto relieve para volver a levantarse en el Cerro Gordo. Al SW. y Sur limitan el horizonte la sierrita de Irolo, con dirección NW. a SE., siendo los cerros de Cuello y Tepayo, sus mayores eminencias, y la sierra de Chimalpa. Al SE. y E. la región es montañosa y se destacan el Peñón del Rosario y la Peña del Tepozán en la Sierra,

que con dirección Sur a Norte separa a los Estados de Hidalgo y de Puebla; sin contar conque desde esta altura se descubren el Xinantecatl, el Ajusco, Iztacchuatl, Popocatepetl, La Malinche y Pico de Orizaba. Tal es el aspecto general de la región. (Véase el plano, lámina 1.)

Los límites geográficos del valle de Tlanalapan, son los siguientes: Por el Norte y NW., un alineamiento orográfico que de Poniente a Oriente lo forman los cerros de la Herradura, Piedra Ancha, de Tepa, de Lucio, de Capula y Tenixtepec. Al NE., se forma una entrante de alguna pendiente que iniciada en el cerro de Tenixtepec y limitada al W. por los cerros de Agua Santa, S. Gabriel y Montecillo, termina en un vallecito alto, cerca del parte-aguas, encontrándose en él y a la altura de 2,540 metros sobre el nivel del mar, la hacienda de Tepechichilco. El borde septentrional de este pequeño valle lo forman los cerros de Tlaxomulco, de las Mesas y la cumbre de Carlota, al Noreste. La entrante que describimos, queda limitada al Este por la falda del Xihuingo que avanza de Norte a Sur; y al Sureste, por el cerrito de Bella Vista o de Tepechichilco. Al NE., el Valle está limitado por el majestuoso aparato volcánico llamado el Cerro Grande de Xihuingo, enorme cono truncado, erizado por apófisis resistentes, de flancos con pendientes de 43° con la horizontal. De este cerro se desprenden y avanzan hacia el W. y SW., es decir, hacia el valle, dos lenguas de formación volcánica, de flancos acantilados que han resistido a los efectos de la erosión; tienen una altura de 240 metros sobre el pueblo de Tlanalapan; están coronadas por mesas planas, ligeramente inclinadas en las direcciones indicadas, con tierras vegetales arcillosas en que se cultivaba la cebada. Al Norte, se inicia la separación de ambas mesas por una escotadura estrecha, profunda y barrancosa, de dirección NS. y llamada Barranca de los Lobos, que después se amplía formando un cono de deyección de magníficas tierras de labor, llamadas Tierras de Belem, abri-

gadas entre los flancos inaccesibles de las mesas mencionadas, de las cuales, la más boreal se llama Mesa de la Fragua, y en ella está ubicado el rancho de Xihuingo. Al SE. está limitado el valle por la barrera montañosa formada por los cerros de Tultengo, Texcazongo, Palpa y Santa Ana, que lo separa de la cuenca de Apan, situada al SE. del valle. Al Sur del cerro de Santa Ana, se forma el límite del valle, por una línea de relieve, que sólo una nivelación o la observación de las corrientes superficiales podría fijar, pues no es un alineamiento orográfico, sino una línea ligeramente levantada, que divide las aguas de la cuenca de Apan, de las que de Calpulalpan y San Lorenzo descienden a Tlanalapan; esta línea termina en las faldas del cerro de Zotoluca. Sigue limitado el valle por la unidad montañosa que se alinea de NE. a SW. formada por varios cerros cuyos nombres en el orden indicado son Santa Bárbara, Santa Clara, Mal País, Cuello, Tepayo y Xaltepec. Finalmente, al SW. y al W., se forman los límites del valle por los cerros de Tlacoayo, Santa Ana (núm. 2) y San Simón, que forman una línea de relieve bien definida al unir sus faldas de suaves pendientes por amplios puertos. El valle de Tlanalapan está abierto al NW., entre el cerro de San Simón y las faldas meridionales de los cerros de Piedra Ancha y de la Herradura; se forma allí una cañada orientada de E. a W., que es la salida del valle, acerca de la cual insistiremos al hablar de la hidrografía de la región.

El valle está formado, en su parte plana, de una barranca de dirección EW. que corre entre las faldas meridionales del Xihuingo y las septentrionales de Santa Ana y Palpa, barranca de San Gerónimo; se amplía al E. en la hacienda de San José, en la falda del Xihuingo y constituye la cañada de Tlanalapan, parte más baja del valle del mismo nombre; la otra parte plana del valle, la de mayor importancia por su superficie, es la que desciende lentamente de S. a N. hacia Tlanalapan, comenzando su descenso en

Calpulalpan, es decir, un plano inclinado de 25 kilómetros de longitud y 12 kilómetros de anchura. Toda la parte plana del valle está interrumpida por eminencias basálticas de poca altura relativa, de las que los cerros de Santa Catarina o de San Isidro, Tlanalapan y Amaninálco, son las principales.

La erosión ha modelado muy distintamente las formas orográficas, de acuerdo con la resistencia de las rocas que las forman; es así como en el cerro de Xihuingo, volcán rhyolítico en un período de erosión que ha llegado a la madurez, se manifiestan los efectos de la disección del aparato volcánico en su vértice y en sus flancos, de la siguiente manera: Cráter principal desgarrado al Sur por una profunda barranca; flancos que han perdido parte de su cubierta de tobas rhyolíticas, y que muestran numerosas salientes o cuellos que formaron el esqueleto de la chimenea volcánica; la fuerte pendiente de los flancos del cono y la poca resistencia de las tobas, han determinado esta forma, que es la más notable en el paisaje de los contornos del valle.

Las corrientes de lava que formaron esas lenguas ya descritas, coronadas por mesas planas, inclinadas y propias para el cultivo, sostenidas por columnas de rhyolita fracturadas vertical y horizontalmente por numerosas diaclasas debido al enfriamiento del magma, son características de la región; no sólo por su relieve, sino por su papel hidrológico, como veremos después. La barrera septentrional del valle es andesítica, coronada por rhyolita, igualmente fracturada con numerosas diaclasas horizontales y verticales, de cuyas fracturas nos ocuparemos más adelante. Esta barrera no define una cresta más o menos clara, sino que es un macizo montañoso terminado en sus cumbres por mesetas planas y de diferente amplitud. Las vertientes meridionales de este alineamiento han sido modeladas así: las partes resistentes son aristas que separan las cabezas torrenciales de los arroyos que las surcan. En Piedra Ancha aparece una parte descubierta por la erosión,

que ha dado nombre al cerro. En la entrante del valle, sobre la misma barrera de cerros de que hablamos, como a 6 kilómetros al Norte de Tlanalapan, en el Cerro de Lucio, en camino para el rancho de Tepa, se ven dos salientes, columnas rhyolíticas, que han dado al cerro el nombre de Las Tetillas, que es bastante descriptivo. La erosión ha modelado de distinta manera las formaciones basálticas, elevaciones de poca altura que han conservado sus formas redondeadas y el perfil suave de las corrientes de lava y de las capas de tobas que cubren a aquéllas, ligando así, suavemente, los perfiles de una eminencia con la inmediata. Nótase el contraste producido por los efectos de erosión sobre el basalto y la rhyolita o tobas rhyolíticas, en el primer caso: conservación de las formas primitivas; en el segundo, tendencia a modelar aspectos abruptos. Sin embargo, la erosión ha descubierto el basalto columnar en el cerro de Santa Catarina; y algo también en el vértice del cerro de Tlanalapan en su lado oriental, dándole el aspecto al cerrito de una valva de ostión: vértice redondeadas en doma, flanco oriental de fuerte pendiente en que se encuentra el basalto columnar y flanco occidental de perfil suave, alcanzando mayor extensión horizontal, camino seguido por las corrientes de lava fluida. Estos son los detalles morfológicos de mayor importancia y sobre algunos, volveremos a tratar en el capítulo de geología.

Apan.—El valle de este nombre está al SE. del anterior. Es de importancia por dos motivos: por tratarse de una cuenca cerrada en la gran altiplanicie mexicana y por estar inmediato a las vertientes del parte-aguas que separa a la cuenca mexicana, tributaria artificial del Golfo de México, del nacimiento del río Zahuapan, afluentes del Atoyac y tributario del Balsas, en la vertiente del Pacífico. La parte plana de este valle cerrado semeja un paralelogramo orientado y en suave descenso de NE. a SW., con una anchura de 10 kilómetros y una longitud de 15 kilómetros. Las alturas que limitan esta cuen-

ca son, principiando por el Norte y siguiendo al W.: Cerro de Palpa, de Santa Ana, línea de alto relieve poco pronunciada y que, como dijimos, termina en las faldas del cerro de Zotoluca; sierra de Chimalpa; cadena montañosa que principia en los cerros de Chulco o Churubusco y de San Pedro, muy próximo a la población de Apan, y que siguiendo una dirección casi de NE. a SW., forman un alineamiento en cuyas faldas se encuentran las haciendas de Espejel, Tlalayote y San Miguel de las Tunas. Los cerros principales que forman este alineamiento son los del Jazmín, Los Reyes y San Miguel; al N. se une por un puerto que es línea divisoria de las aguas el cerro de San Miguel con los de Tultenango, Las Víboras y San Gerónimo, para cerrar así el contorno que circunscribe a la cuenca de Apan.

Alcantarillas.—Pasado el último parteaguas de que hemos hecho mención, se encuentra el rancho de Santa Cruz, al pie casi del cerro de Tultengo; de Santa Cruz, y en suave descenso hacia el S. 80° E. se encuentra a 2 kilómetros la hacienda de Alcantarillas, a 2,480 metros sobre el nivel del mar, en donde se encuentran los manantiales que abastecen al pueblo de Tepeapulco. La hacienda de las Alcantarillas es una cañada orientada de SE. a NW., limitada al S. y al N. por lomeríos alineados y al W., por el cerro de Tultengo. Esta cañada está abierta al Norte e hidrográficamente es tributaria de la cuenca cerrada, cuyo fondo más bajo es el vaso de la laguna de Texocomulco que se encuentra al pie y al E. de los cerros de Corralillos, Palo Huevo y Santa Ana (núm. 3), desprendimientos del núcleo conocido del Xihuingo, y al Norte de la laguna de Apan. Esta cañada de Alcantarillas es de gran importancia hidrológica.

Hidrografía

La hidrografía de la región es muy sencilla: las aguas superficiales reconocen como thalweg general el arroyo denomi-

nado El Papalote; nace al pie del cerro de Tultengo, corre con una dirección de E. a W., entre la falda meridional del Xihuingo y las septentrionales de Palpa y Santa Ana, con el nombre de barranca de San Gerónimo, barranca que al ampliarse, forma la parte más baja del valle de Tlanalapan. El arroyo sigue con el mismo curso medio para tomar la salida del valle entre los cerros de S. Simón y de Piedra Ancha y la Herradura, pasando al Sur de Amiltepec. El Papalote sigue su curso al Sur del cerro de Zempoala y pasa entre la sierra de los Pitos y el lomerío de Santa María, para verter sus aguas en la Presa del Rey. Es un arroyo de régimen torrencial; ha labrado su curso sobre las tobas basálticas cementadas con lechos delgados de cenizas volcánicas, y como a 3 kilómetros del pueblo de Tlanalapan, descubre una corriente basáltica de roca negra y muy porosa. Su sección transversal es muy pequeña: 3 metros de anchura por 2 metros de profundidad. Si las precipitaciones pluviales no son abundantes, su corriente se pierde por infiltración y evaporación antes de alcanzar el punto más bajo de su curso, lo que indica dos cosas: falta de manantiales o fuentes que alimenten su curso, y la permeabilidad de su lecho. Los arroyos tributarios del Papalote, descienden rápidamente de las vertientes que lo encajonan, y son por la derecha, o sea del Norte: la barranca acantilada y profunda que principia en la desgarradura del antiguo cráter del Xihuingo y que en dirección de N. a S. pasa por la ranchería de los Cides, antes de verter sus aguas en el arroyo de San Gerónimo; las corrientes temporales que descienden de Tepechichilco con dirección NE. a SW., ocupando el thalweg de la barranca del Sabino o de San Marcos, que recoge las aguas torrenciales de la herradura montañosa de Tepechichilco, se encajona y profundiza su curso en el rancho del Tejocote, para venir a unirse al Papalote un kilómetro al Norte del pueblo de Tlanalapan; sigue después las barrancas de Capula y de Tepa, que descienden del ce-

rro de Lucio en terrenos de la hacienda de San Pedro Tochatlaco, los arroyos de Tequexquinalhua y otros de menor importancia que surcan las laderas meridionales de los cerros de Piedra Ancha y La Herradura. Por el Sur recibe corrientes del mismo régimen de los cerros de Tultengo, Texcazongo, Palpa y Santa Ana; y las corrientes superficiales del plano inclinado que desciende de S. a N. desde Calpulalpan y San Lorenzo y que con una anchura media de 12 kilómetros y una longitud de 25, es hidrográficamente tributario del Papalote. Accidentalmente recibe el Papalote las aguas de la laguna de Apan, en virtud de un emisario artificial de dicha laguna que se abrió para disminuir la superficie que antes ocupaba; este canal tiene una sección de 2 metros en el lecho, por 3 metros de altura y sus paredes en talud; funciona como un vertedor de la laguna. El aspecto hidrográfico está caracterizado por los numerosos "jagüeyes" diseminados en toda la parte plana del valle de Tlanalapan. Casi no hay hacienda que no tenga dos o tres de ellos. Estos depósitos artificiales que recogen las aguas de lluvia, alimentan a personas y ganados. Tlanalapan cuenta con tres jagüeyes, de los cuales dos se llenan después de recibir el drenaje del pueblo. El agua almacenada por este sistema rudimentario y anti-higiénico, no basta algunas veces para las necesidades de Tlanalapan y en los años escasos de lluvias, se pierde por evaporación la que se ha acumulado.

Un hecho muy significativo nos dice algo acerca de la historia hidrográfica de esta zona de Tlanalapan, observado también en la cuenca de Apan: los cascos de las fincas, los pueblos y rancherías se fijaron en las faldas de los cerros y de las lomas, no encontrándose vestigios de habitaciones humanas en las partes bajas de los valles. Esto hace pensar en que el régimen hidrográfico era muy distinto del actual y que el cambio que implica no es de época remota. Las cuencas cerradas de Apan y Texcomulco tuvieron su semejante en Tlanalapan y ya veremos demos-

trada después la existencia de estos depósitos lacustres en época reciente. La cañada de Alcantarillas que, como dijimos en el capítulo anterior, es tributaria hidrográficamente de las lagunas de Texcomulco, hace su drenaje superficial por el arroyo que con curso del SE. al NW. desciende del Aserradero de Santa Inés, perteneciente a la hacienda de Tepozán; nace en las vertientes occidentales de la sierra que con dirección de S. a N. divide, como dijimos antes, los Estados de Puebla e Hidalgo, separando los Distritos de Zacatlán y Huauchinango del primero, de los de Apan y Tulancingo del segundo; es un apéndice de la Sierra Madre Oriental que penetra después en Huayacocotla, Estado de Veracruz, y en Zacualtipán, Hgo. A ese macizo montañoso de primera importancia deben su existencia los manantiales de Alcantarillas.

Examinada ya la hidrografía de la región, podemos decir que el área que drena superficialmente el Papalote, puede valuarse, aproximadamente, en 195 kilómetros cuadrados. La cuenca hidrográfica de Apan puede estimarse en 120 kilómetros cuadrados de superficie. Ahora bien, la red hidrográfica en el estado actual de su ciclo, es el efecto integral de los accidentes del relieve en primer término, y de la erosión después; no es exagerado decir, por lo que llevamos descrito, que en el Xihuingo es donde se origina la red hidrográfica de la región; efectivamente, en alrededor de este prominente núcleo del relieve y en posición divergente o estrellada, se disponen las cuencas cerradas de Texcomulco y de Apan, el valle de Tlanalapan segregado del último mencionado y abierto al W., la cañada de Carlota cuyo eje es paralelo al curso del Papalote y abierta al W. en dirección a Tecajete; y al N., el principio del valle de Tulancingo.

Geología

La historia geológica de la región está íntimamente ligada con la de la cuenca hidrográfica del Valle de México, y más generalmente, con los acontecimientos que

determinaron la formación de la Mesa Central Mexicana y con los accidentes subsiguientes, cuyas fases evolutivas han sido ya descritas por eminentes y reputados geólogos mexicanos y extranjeros. Encuéntrese en los límites del terreno estudiado los testigos de aquellas fases por las que atravesaron el valle de Tlanalapan y cuencas adyacentes, desde la formación del zoclo continental hasta la época reciente.

Los movimientos orogénicos poderosos que determinaron el levantamiento del banco continental, tuvieron un carácter de universalidad ya admitido. (1) El origen de las cuencas continentales fué tectónico, habiéndose producido por hundimientos de mayor o menor extensión superficial a lo largo de líneas de mínima resistencia; simultáneamente con las depresiones así formadas, se hacía el levantamiento de las sierras que limitaban los hundimientos. Estos movimientos orogénicos produjeron el contraste del relieve entre el fondo submarino y los bordes del banco continental, fenómeno que al realizarse, dislocó, plegando y fracturando por compresiones laterales los sedimentos del Cretácico, removiendo algunos sedimentos eocenos y miocenos. (1), (2), (3). Por esas líneas de fractura y afallamientos, ya producidos por movimientos generales o bien locales, se facilitaron las manifestaciones volcánicas (3) que principiaron con las erupciones de las dioritas del Eoceno, y continuaron las andesitas de hornblenda en el Mioceno, y las andesitas de piroxena del Mioceno superior al Plioceno. El Sr. D. José G. Aguilera (2) dice, en adición a lo anterior, que las andesitas verdes aparecieron a fines del Mioceno. Esta es la primera página de la historia del valle de Tlan-

alapan: el cerro de San Simón, situado a 4½ kilómetros de distancia, al W., y a 390 metros sobre el pueblo de Tlanalapan, o sea a 2,770 metros sobre el mar, es una eminencia cuyo esqueleto está formado de andesita de hornblenda (x) que la erosión ha dejado al descubierto en su vértice. No se le encuentra por la misma causa, ningún vestigio de cráter; es indudable que ya ha sido destruído. Las faldas del cerro se encuentran ocupadas por tobas basálticas de los cerros de Tlanalapan y de Santa Catarina. (Véase perfil núm. 1.) El cerro de San Simón es el testimonio más antiguo de las rocas que hicieron erupción en el valle de Tlanalapan. La andesita de hiperstena, probablemente pliocénica, se presenta hasta media ladera en la barrera septentrional del valle en el cerro de Lucio, en Tequexquináhua, sirviendo de lecho impermeable a los pseudo-manantiales del último lugar mencionado. (Véase perfil núm. 2.) Después de las erupciones de andesitas que por su denudación llenaron en parte los valles o cuencas profundizadas por acción tectónica, vino un período de diastrofismo en que los sedimentos detríticos de dioritas y andesitas fueron trastornados; de este período no tenemos testigos en la región; deben ser capas profundas, rellenando el lecho andesítico e impermeable, cuya existencia está demostrada en Tlanalapan y a la cual le asigna el Sr. Ingeniero D. Juan D. Villarello (4) un papel hidrológico de mucha significación. Pasado este período de tranquilidad eruptiva e interrumpido por acciones tectónicas simultáneas con la deposición de elementos detríticos, vino en el Plioceno (2) y (3), el gran período eruptivo de carácter rhyolítico; la región cuenta con testimo-

(1) Morfología y origen de la Mesa Central de México, por el Dr. Ernesto Wittich, 1918.

(2) Las Rhyolitas de México, Boletín núm. 14 del Instituto Geológico de México, por el Sr. ingeniero D. Ezequiel Ordóñez, 1900.

(3) "Sobre las condiciones tectónicas de la República Mexicana," por el Sr. D. José G. Aguilera, México, 1910.

(x) Actualmente no hay en el Instituto Geológico una persona encargada del importante ramo de Petrografía, me he conformado con dar nombres a las muestras recogidas por sus caracteres macroscópicos; así pues, siendo la clasificación un asunto de especialización, este punto está sujeto a rectificaciones posteriores.

(4) Las aguas subterráneas en el borde meridional de la Cuenca de México, Bol. núm. 28 del Instituto Geológico de México, por el Sr. Ing. D. Juan D. Villarello, 1911.

nios de haber participado en esta acción reconstructiva del relieve, de la que fué teatro nuestra gran Mesa Central. Las rhyolitas aparecieron por dos mecanismos eruptivos distintos: por cráteres y por grietas. El Xihuingo es el tipo de la primera forma: proporcionó después de las voluminosas corrientes de lava que forman las lenguas de que ya hablamos, tobas rhyolíticas, que con otros productos de proyección arrancados de las paredes de su chimenea, dieron su forma y volumen al cono que morfológicamente ya conocemos. Este período eruptivo fué seguramente prolongado, dado el volumen del material eyectado; debió seguir a la erupción por el cráter mayor, un período de tranquilidad; y como sucede algunas veces (5), sobrevino un paroxismo que determinó la fractura de la vieja chimenea y produjo un cráter adventicio o de "explosión," formado al N. del primero, y que hoy se conoce con el nombre demasiado gráfico de "La Palangana;" y que es un círculo de 300 metros de diámetro, cuyos bordes bien recortados, están cubiertos de vegetación y 120 metros más abajo que los bordes del cráter principal. La segunda forma de erupción se manifiesta en la barrera montañosa septentrional Lucio-Herradura. Las rhyolitas de color rosa y casi rojo, de estructura fluidal bien definida, descansan sobre las andesitas de hiperstena y coronan las crestas de esta barrera que separa al valle de la cañada de Carlota. No se encuentran cráteres en este alineamiento orográfico, en cambio las rhyolitas están fracturadas por grietas horizontales y verticales, lo que indica un enfriamiento rápido del magma. El sistema más desarrollado es el del rumbo EW., que es el del alineamiento orográfico; no existen brechas y conglomerados que afloren sobre estos prismas fracturados; por lo que es de creerse, que el magma no muy fluido, por ser muy ácido y por tanto alejado de su punto de fusión, hizo su eyección fracturándose en la forma indicada al enfriarse completamente. En el

cerro de Lucio, hacienda de San Pedro Tochatlaco, cerca del parte-aguas y al Norte del camino para el rancho de Tepa, hay fracturas numerosas cuyas posiciones son las siguientes: rumbo EW. vertical; rumbo N. 75° W. casi vertical; rumbo N. 20° E casi vertical; rumbo N. 65° E., echado al S. 25° E. de 68°; todas estas fracturas están rellenas con material detrítico de la propia rhyolita; pero en la misma localidad existe un sistema de grietas rellenas de calcedonia; este sistema importante tiene un rumbo de N. 25° W. con un echado de 41° al S. 65° W., la fractura varía entre 8 y 30 centímetros de anchura. Las fracturas prevalecen aún en el cerro de Xihuingo, en cuya cumbre se encuentra una diaclasa de 10 centímetros de anchura vertical y con rumbo NS. rellena con fragmentos de tobas rhyolíticas, material poroso. La forma eruptiva por cráteres fué más completa: en sus manifestaciones se alternaron las corrientes rhyolíticas con los conglomerados, brechas y tobas. En el rancho del Ciprés (véase el perfil núm. 3), una gruesa capa de brecha de 1.20 metros de espesor, formada de grandes fragmentos cementados con las cenizas y el lodo volcánico, recubre una corriente de labradorita, roca de color gris muy oscuro, con numerosos cristales de olivino, muy cristalina, conteniendo numerosas burbujas elípticas de 6 a 7 milímetros orientadas según sus ejes. Aquí existe "un respiradero" del cual hablaremos después. A la brecha la cubren las tobas y la tierra vegetal hasta llegar al rancho de Xihuingo, en la mesa de La Fragua. Las tobas rhyolíticas del cono ocupan la parte más alta del perfil. Ya se verá por esto que el material rhyolítico, ya por su volumen, ya por el desgaste que sufría por la erosión, había de proporcionar los elementos para rellenar las cuencas profundizadas anteriormente por el tectonismo. Tlanalapan fué indudablemente una cuenca cerrada, como la mayoría de las cuencas continentales en que la erosión no tuvo gran actividad (5) para ligarlas entre sí, no haciéndose por esa causa el drenaje

(5) *Traité de Géographie Physique* par Emm. de Martonne, París, 1913.

superficial rápidamente. Vinieron después a proporcionar mayor cantidad de material, que relleno las cuencas, levantando su nivel, las erupciones basálticas pleistocenas y recientes (3). En este nuevo período reconstructivo, los basaltos que inundaron el valle de Tlanalapan fueron proporcionados por los cerros de Santa Catarina, Tlanalapan, Santa Ana, y las numerosas jibas que se levantan en las cercanías. Nos parece más interesante decir algo acerca de los dos primeros cerros: en el de Santa Catarina, en su vértice más alto, resto de un cráter ya destruído, se presenta el basalto columnar fracturado horizontal y verticalmente; sobre la falda que desciende al pueblo, se manifiesta un dique de basalto con rumbo NS. y anchura de 2 metros, aparece muy erosionado y está dividido en numerosos bloques; esto indica cuál fué una de sus fases eruptivas. Las tobas y lechos delgados de pómez, cubren las faldas del cerro, y diseminadas en el campo de tobas, se encuentran fragmentos de obsidiana y bombas volcánicas. La erupción basáltica en el cerro de Tlanalapan debe haber sido compuesta, es decir, los períodos de violentas explosiones en que los productos de proyección rellenaron parte del valle, alternaron con la polución de lavas fluídas. A 500 metros al W. de la parroquia de Tlanalapan, y a 18 metros de profundidad, se encuentra una corriente de basalto negro y esponjoso. Productos brechiformes y de lapilli forman bolsones de material flojo y poroso que rellena las cavidades entre las corrientes de basalto. Finalmente, hubo una eyección basáltica que se enfrió rápidamente, sufriendo fracturas horizontales que le dieron la forma de "una doma" ligeramente convexa, y así se obturó el cráter que le dió salida. Probablemente puede clasificarse esta doma con el nombre de "doma ácida." (5) (*) Las erupciones basálticas, al mismo tiempo que fueron agentes reconstructivos del relieve, fraccionaron las cuencas hidrográ-

ficas y se segregaron Texocomulco, Apan y Tlanalapan; este último valle fué una cuenca cerrada como lo prueban los depósitos lacustres puestos al descubierto en dos cortes (véanse cortes 4 y 5) artificiales: uno en una excavación de 57 metros de largo y 2.50 metros de profundidad, hecho en la hacienda de San José, en la falda del Xihuingo, y otro en la perforación de una noria al W. del pueblo. El estudio de las capas de sedimentos de estos dos cortes, nos induce a creer que en el período de sedimentación, por causas geodinámicas locales, fueron dislocados los sedimentos, produciéndose, como se ve en el corte núm. 4, una falla en los sedimentos fuertemente dislocados; esto trajo consigo la reducción en el vaso de la cuenca por el levantamiento de la cañada o barranca de San Gerónimo, entre la falda de Xihuingo y cerros de Palpa y de Santa Ana. De las siete capas que presenta el corte núm. 4, la capa núm. 6 es un tizar que tiene 6 metros de potencia. Supliqué al geólogo D. Enrique Díaz Lozano, que ha hecho de la diatomología, rama de la botánica, un estudio especial, que examinara las muestras de este tizar y del de la noria citada, (corte núm. 5) y que a los 3.50 metros de profundidad y con una potencia de 14 metros, descansa sobre una capa de basalto negro y muy poroso. El Sr. Díaz Lozano se sirvió darme la nota siguiente, que transcribo íntegra:

*"Muestras conteniendo frústulas
de diatomeas"*

"Muestra tomada de la capa marcada con el número 6 en la excavación de la hacienda de San José:

"Es un trípoli impuro, compacto y de color blanco. Los esqueletos de diatomeas contenidos en esta muestra, se encuentran bastantes destruídos; y entre ellos se pudieron determinar como principales los siguientes: En el género *cocconeis* Ehb., se observaron dos especies; una de ellas parece pertenecer a la *C. lineata* Grun. El género *Epithemia* Breb. está represen-

(*) Teniendo en cuenta su morfogenia simplemente.

tado por las especies *E. Argus* Kz. y *E. Gibba* Kz. Entre las Naviculaceas, el género *Navicula* Bory, por el subgénero *N. Pinn. major* Kz. Existe, además, el género *Gaillonella* Bory (*Melosira* Agar), entre cuyos individuos se encontró la especie *G. distans* Ehb. Entre las impurezas, puede mencionarse la existencia de espículas de esponja, arcilla, vidrio volcánico y productos de desagregación."

"Los restos diatomíferos encontrados dan al yacimiento los caracteres de un depósito formado en el seno de aguas dulces."

"Muestra tomada a 12 metros de profundidad, en una noria, distante 500 metros al W. de la parroquia de Tlanalapan."

"La muestra es blanca, ligeramente agrisada y deleznable, más pura que la muestra anterior. Los restos orgánicos encontrados son de una flora diatomífera, representada principalmente por el género *Coscinodiscus* Ehb. Las especies encontradas pueden relacionarse con el *C. radiatus* Ehb., que es al que más se aproximan, habiéndose encontrado los dos tipos, uno con espinas marginales y el otro sin ellas, que a su vez han sido observados entre las diatomeas del subsuelo del lago de Texcoco (*) y en los depósitos diatomíferos del valle de Toxí, Estado de México. La presencia de este género en la muestra, le da al depósito de donde fué tomada, un origen termo-salado, puesto que este género se desarrolla solamente en esta clase de aguas."

"Se encuentra también el género *Epi-themia* Breb. con la *E. Hyndamanni* W. Sm., estando representado, además, el género *Cocconeis* Ehb."

"En resumen, estos restos orgánicos se presentan bastante fragmentados, estando mezclados con espículas de esponja y algunas impurezas."

Esta nota es concluyente acerca del origen y condiciones de los depósitos lacustres revelados por estas tierras infusoria-

(*) Diatomeas fósiles del subsuelo del lago de Texcoco. Anales del Instituto Geológico de México, núm. 1, 1917, pág. 26.

les y robustece la creencia de que el vaso lacustre fué reducido en extensión y profundidad: 1.º por la dislocación de los sedimentos (véase el corte 4), que determinó un levantamiento relativo de parte del fondo; 2.º por la acumulación de nuevos sedimentos y acarreo que determinaban una reducción en el volumen del agua, facilitando su evaporación más rápida; esta última circunstancia y la intervención de nuevos períodos eruptivos que recalentaban las aguas, hicieron de ese depósito el medio apropiado para el desarrollo de la flora que lo caracteriza. Los sedimentos lacustres termo-salados hicieron el relleno de la cuenca, nivelando su fondo; se presentan actualmente en capas horizontales, no trastornadas. Por este rápido proceso se convirtió la cuenca cerrada de Tlanalapan en el valle abierto al W., como lo conocemos. Posteriormente una pequeña capa de tobas y cenizas volcánicas bien cementadas, cubrió los sedimentos lacustres. (Véanse cortes 4 y 5.)

Hidrología

Creo que la descripción fisiográfica y geológica que hemos hecho de la región, nos permitirá conocer algo de su hidrología subterránea.

La fórmula hidrológica de E. Martonne: (5.)

$$D = P - (I + E_1 + E_2) + S,$$

o bien:

$$P - D = I + E_1 + E_2 - S.$$

expresa claramente el ciclo y destino de las aguas que se precipitan en una cuenca cualquiera. P es la altura de precipitación pluviométrica o "índice pluviométrico." D es el índice de circulación superficial, o sea el cociente que resulta de dividir el gasto de las corrientes superficiales, ríos y arroyos tributarios, por el área de la cuenca de drenaje superficial. P-D es el déficit de circulación, y es igual a la suma de las pérdidas por infiltración en el subsuelo I, por evaporación física E_1 y por evaporación fisiológica por medio de las plantas E_2 , menos la cantidad que

reaparece en la superficie en la forma de manantiales S. Veamos para la región que nos ocupa, qué cantidades conocemos de las que entran en la fórmula. No existen observaciones meteorológicas de Tlanalapan, pero para Apan tenemos los siguientes datos: $P=703^{\text{mm}}$, temperatura media anual $14^{\circ}7$ C. (*). Evaporación media anual en la cuenca del Valle de México 5^{mm} 5 (Anuario Estadístico de la República Mexicana, año de 1904). Los señores Aguilera y Ordóñez (6), según los datos del Observatorio Meteorológico Central, le dan a la evaporación media el valor de 6^{mm} 6 en la cuenca del Valle de México. Dada la manera de calcular en los observatorios esta media anual de evaporación, resulta que la evaporación total anual para Tlanalapan, aceptando el valor de 6^{mm} 6 será de 79^{mm} 2, es decir, muy aproximadamente E_1 es la décima parte de $P=703^{\text{mm}}$, que es el valor que aceptaremos para Tlanalapan, aunque es dato que, como dijimos, corresponde a Apan, en donde hubo una estación termoplumiométrica. No es exagerado este valor para E_1 en vista de que la evaporación en los meses de sequía es activa por falta de vegetación en el Valle de Tlanalapan. E_2 es una cantidad desconocida para nosotros y si no podemos valuarla, en cambio no debemos considerar nula su influencia. Los señores Aguilera y Ordóñez (6) consideran que un 5% de la precipitación se pierde por absorción propiamente dicha, es decir, es el agua de impregnación que retienen las rocas por capilaridad, "en las rocas poco coherentes alcanza su mayor valor, siendo siempre inferior a un 5%." Esta cantidad de agua de absorción no considerada por Martonne en su fórmula,

podemos tomarla por E_2 y dándole el valor del 5%, resulta $E_2=35^{\text{mm}}$ 1. Esta no es una substitución arbitraria, pues Charles S. Slichter (7) dice que del agua que se infiltra, una porción es absorbida temporalmente por la superficie del suelo y es devuelta a la atmósfera ya por evaporación directa o por intermedio de la vegetación. Tal es el agua de absorción a que se refieren los señores Aguilera y Ordóñez. Ahora bien, en Estados Unidos de Norteamérica, se ha hecho un estudio muy detallado de la relación $\frac{D}{P}$ que Martonne (5) llama coeficiente de circulación superficial, las observaciones han sido tan numerosas como bien conducidas para llegar a establecer leyes generales; y a falta de medidas de gastos en el Papalote y arroyos tributarios, aprovecharemos algunas de las conclusiones establecidas: en las zonas templadas, mientras P es inferior a 250^{mm} , D es prácticamente nulo; en las zonas calientes, para valores de P inferiores a 400^{mm} y aun a 500^{mm} , D sigue siendo poco diferente de cero. D empieza a tener valores para P , superiores a 250^{mm} y 500^{mm} en las zonas templadas y en las calientes, respectivamente. En la zona templada para $P=500^{\text{mm}}$, $D=25^{\text{mm}}$, y para $P=750^{\text{mm}}$, $D=200^{\text{mm}}$.

Estos datos son tan concluyentes que no dudamos en aceptarlos, sin olvidar, por supuesto, que D es función de la pendiente, de la temperatura, de la evaporación y de la naturaleza de las rocas permeables o impermeables (8). Substituyendo los valores anteriores en la fórmula de Martonne, tendremos:

$$I = 703.1 - (200.0 + 79.2 + 35.1) = 388.8$$

No dejaremos de insistir en lo que llama notable concordancia y no simple coincidencia entre las conclusiones de la obra citada (6) y el valor de la relación $\frac{D}{P}$

(*) "Promedio de temperaturas y precipitaciones de algunas localidades de la República Mexicana." Album inédito formado por el Sr. Carlos G. Mijares, Ayudante de Hidrología del Instituto Geológico Nacional.

(6) Boletín de Agricultura y Minería, Secretaría de Fomento, 1893-1894, Núm. 37. Informe de la Comisión Geológica sobre los trabajos hidrológicos de la cuenca del Valle de México, por los señores ingenieros J. G. Aguilera y E. Ordóñez.

(7) The motions of underground waters by Charles S. Slichter. Water-Supply and Irrigation Papers of the United States Geological Survey número 67, 1902.

(8) An Introduction to Geology by William B. Scott. Chapt. V., pág. 124, 1909.

obtenida por vía muy distinta. Los señores Aguilera y Ordóñez asignan al agua que circula superficialmente un valor de un tercio del de precipitación, restando a éste las pérdidas por evaporación y absorción; esto se verifica para Tlanalapan si se examinan las cantidades anteriores. Se es prácticamente nulo por la falta de manantiales de la región.

Las áreas ocupadas por las distintas rocas se marcan en el plano de la lámina I. Todas son más o menos permeables, desde las rhyolitas fracturadas de permeabilidad localizada en sus diaclasas numerosas, hasta las capas de arenas volcánicas porosas y poco coherentes; sólo las superficies cubiertas por las tobas basálticas litoides que rellenan una buena parte del valle, pueden considerarse como de muy poco poder absorbente. Así es que no toda la superficie de la cuenca hidrográfica puede tomarse como superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, y descontando esta área cubierta por las tobas bien cementadas, puede estimarse que el área de alimentación es los dos tercios de la de la cuenca de drenaje, es decir, 130 kilómetros cuadrados, por lo que el agua que se infiltra anualmente tiene un volumen de 50.544,000 metros cúbicos.

En la región tenemos las rocas siguientes: tobas rhyolíticas porosas, pulverulentas, en fuerte pendiente; rhyolitas en corrientes con numerosas diaclasas; extensiones ocupadas por tierras vegetales, arcilla y detritus que provienen de la denudación de las tobas rhyolíticas; tobas basálticas que cubren los flancos de los cerros y rellenan el valle, dejando aflorar el basalto columnar en los vértices de los cerros y descubriendo a la salida del valle una corriente de basalto negro y escoriáceo en el fondo del arroyo; tobas divididas por leptoclasas en hojas delgadas y muy fracturadas que descansan sobre capas dislocadas, fracturadas y afalladas de sedimentos lacustres: detritus de las rocas superiores, cenizas y arenas volcánicas y trípulis. Las tobas disecadas por profundos y estrechos escurrideros en el cerro de

Tlanalapan y las cuevas de tezontle hechas al N. del pueblo para obtener materiales de construcción, han descubierto los materiales sólidos que fueron productos de proyección en las erupciones; éstos son fragmentos de un diámetro medio de 1 centímetro, angulosos y sueltos, que llaman en el lugar "quemazones" por el color negro de la arena volcánica en que se encuentran; otras veces son las brechas volcánicas tan deleznales y poco coherentes como el mismo lúpilli; estos bolsones de material permeable y muy poroso se apoyan sobre corrientes de basalto, también poroso y permeable. En el rancho del Ciprés existe un "Respiradero" como a 3.5 kilómetros al NE. de Tlanalapan y 60 metros más alto que el pueblo; éste consiste en una perforación irregular de 2 metros de profundidad, en que la brecha volcánica, con espesor de 1.20 metros, cubre una corriente de labradorita ya descrita en otro lugar. En el fondo de esta cavidad existen lugares vacíos dejados por los bloques de labradorita, y por allí sale una corriente de aire, que circula por conductos subterráneos, produciendo un ruido semejante al de una corriente de agua encajonada y en fuerte pendiente. No hay huellas de humedad en la boca de este "respiradero." El aire que sale tiene una temperatura de 9° C. y la del aire ambiente exterior era de 16° C., en el momento de la observación. Es muy común en los terrenos volcánicos la formación de estos conductos subterráneos, que por sus dimensiones, ya sean cavernas o tubos, son de tanta importancia hidrológica como los de las formaciones calizas; unos y otros aunque de distinto origen, crecen lentamente y aumentan los efectos de la erosión subterránea (5). El Sr. Ing. Villarelo explica claramente la formación de estas cavidades supercapilares en las corrientes de lava (9). En los basaltos escoriáceos de "Las Cuevas," se observan

* (9) Circulación subterránea del agua por diaclasas o cavidades supercapilares, por el ingeniero de minas, Juan D. Villarelo. Bol. de la Soc. Geológica Mexicana. Tomo VII, págs. 31-46, 1910

depósitos concrecionales de carbonatos alcalinos hechos por el agua que circula por sus poros y grietas. El proceso de formación de estas concreciones podía llegar, en otras condiciones, a formar estalactitas y estalagmitas como las de las cavernas en las calizas.

Existe dentro del valle de Tlanalapan otro "respiradero" en terrenos de la hacienda de San Isidro. Estas cavernas se observan también en Otumbá y en Axapusco; el Sr. Ing. D. Anselmo Camacho (mi padre) tuvo la bondad de proporcionarme esos datos, y tengo el honor de publicar (lámina III) un croquis a escala, de la región que él estudió hace años, que contiene, además, el corte del pozo de Axapusco, ambos formados con las notas de su cartera. El Sr. Ing. Camacho dice: "en estas cavernas se invierte a veces el sentido de las corrientes de aire y las modificaciones de la temperatura producen variaciones en la altura de los sonidos." Axapusco está como a 18 kilómetros al SW. de Tlanalapan.

Ya se verá, por lo dicho, que el subsuelo del valle es permeable en grande escala, que el poder absorbente del suelo y del subsuelo es aumentado por la débil pendiente peculiar de los perfiles de lavas basálticas; y finalmente, que la circulación subterránea de las aguas se hace por cavidades supercapilares y diaclasas (9) en rocas coherentes; y en menor proporción se verifica la infiltración por los poros y conductos capilares de los sedimentos lacustres que rellenan el valle. La circulación subterránea se hace en un medio cuya permeabilidad es manifiesta, su mecanismo ha sido ya descrito por los especialistas en la materia (7) y (9); y a primera vista sería de creerse que la naturaleza procede en este punto con la misma sencillez que en las obras artificiales realizadas por el hombre. No sucede así: el movimiento no se verifica en el medio subterráneo como circula el agua por tubos y canales. La gravedad se combina a cada instante con la capilaridad y el resultado de la composición de estas dos fuerzas, determina una velocidad de

circulación variable en magnitud y dirección. Las consideraciones teóricas de Dupuit (10), confirmadas después por las experiencias de Darcy, que dió sus fórmulas y las de Allen Hazen y C. S. Slichter (7) y (11) para determinar la velocidad de circulación del agua subterránea, no son de importancia para nuestro caso particular, porque además de no ser muy numerosas las experiencias y de no haber alcanzado otros límites que los del laboratorio, estudian la circulación del agua en columnas de terreno constituido de materiales porosos e incoherentes, en que juega importante papel la capilaridad, sólo debemos decir que la velocidad de circulación es bastante grande en el subsuelo permeable del valle de Tlanalapan. Podemos distinguir dos zonas de circulación: la superior al nivel de drenaje superficial del valle y la inferior a este nivel. Mientras el agua en su trayecto subterráneo atraviesa la primera zona, en los lomeríos del Norte y en las mesas de Xihuingo, si la estación es lluviosa, las aguas descenderán predominando la gravedad, de preferencia se hará la circulación por las numerosas diaclasas de las rhyolitas y aparecerá en parte y en cantidad insignificante en el contacto de estas rocas con las andesitas impermeables, como pasa en el "Ojo del Cristo" o manantial de Tequexquinahua. El gasto de este falso manantial es muy corto; la temperatura del agua es próximamente la del aire ambiente. El manantial de Tepchichilco, situado a 150 metros sobre el arroyo de Papalote, brota en el contacto del basalto y de las tobas, su gasto es muy pequeño y variable con la estación del año; la temperatura del agua es poco diferente de la del aire ambiente. El Sr. Ing. Villarello (9) cita varios casos de existencia de manantiales en los

(10) Mécanique Hydraulique et Thermodynamique, por G. Darcy. París, 1906.

(11) Investigación y estudio de las napas de agua por medio de las perforaciones, por los inspectores E. Felzmann y J. Langer. Minis. de Agr. de la Nación. Dir. Gral. de Minas, Geología e Hidrología, Bol. núm. 2, serie C. (Hidrología y Perforaciones.) Buenos Aires, 1916.

bordes de las corrientes de lava que contienen venas acuíferas; lo mismo hace M. A. Daubrée (12) señalando muchas localidades en que aparecen manantiales abundantes en las extremidades de las corrientes de lava, que han permitido sobre su superficie una voluminosa infiltración de las aguas meteóricas; pero en Tepechichilco el anfiteatro que circunscribe el área de alimentación de ese pseudo-manantial es muy pequeño y la región activa (9) es muy pobre. Actualmente se hace un pozo en la hacienda de Montecillo como a 500 metros al W. del manantial de Tepechichilco. Cuando lo visité tenía la profundidad de 3.50 metros, se habían atravesado tobas basálticas y se llegó a una capa delgada de arena seca; por ahora no tengo más datos acerca de este pozo.

Durante la estación seca y de grande evaporación, la componente capilaridad tiene mucha influencia en esta zona superior de circulación subterránea que hemos considerado; un movimiento ascensional de los filetes acuíferos en las cavidades capilares puede detener la circulación y anular el gasto exiguo de esos pseudo-manantiales.

Veamos ahora cómo se verifica la circulación del agua abajo del nivel de drenaje superficial del valle: en la primera parte de su curso, las aguas tendrán un movimiento rápido por las cavidades supercapilares ya descritas; la circulación descendente se hará por las diaclasas y las cavernas, al principio amplias, y que a la profundidad se van estrechando, para convertirse en conductos capilares y aun subcapilares, en donde la circulación subterránea tiene un mecanismo diferente y la velocidad es muy pequeña. Prácticamente se suspende el movimiento descendente del agua subterránea al acercarse a la superficie que limita inferiormente la zona de fracturas de las capas permeables; este límite inferior, en que la rigidez de las rocas, a causa de las

presiones a que están sometidas, las hace impermeables, es señalado como el nivel más bajo de los manantiales (9) o como fondo de una zona acumulante de las aguas subterráneas, cuando esta superficie impermeable, de que habla Van Hise (7), no tiene una línea de intersección con la superficie del terreno, como pasa en el valle de Tlanalapan. En esa zona profunda en que las cavidades y fracturas se han transformado en conductos capilares, los filetes líquidos en la primera sección de su curso se separan poco de la vertical para seguir después un trayecto casi horizontal, como la rama de una hipérbola que se acerca a su asíntota. En las cercanías de la superficie límite de la zona fracturada, es decir, en la zona acumulante de que hicimos mención, los filetes líquidos serán poco más o menos horizontales; no habrá presión hidrostática o será muy pequeña y el movimiento muy lento; desde ese nivel hasta la capa impermeable inferior se tendrá la región activa de los manantiales (9); o bien la *región acumulante* si no hay manantiales. Las condiciones que han determinado la formación de la cuenca de Tlanalapan y su rellenamiento, trajeron como consecuencia el descenso efectivo del nivel hidrostático, obrando también como factor importante la erosión, que ha quitado a la superficie de alimentación su cubierta de materiales incoherentes, que favorecían la infiltración en mayor abundancia en la zona de alimentación de los receptáculos subterráneos. El fondo impermeable está constituido por las andesitas que afloran en el cerro de San Simón; esta misma roca forma el esqueleto de la sierra de Irolo a San Lorenzo y de la sierra de Chimalpa, límites meridionales de la cuenca que estudiamos. Descansando en ese fondo o lecho andesítico, se encuentra acumulada en las irregularidades de su relieve; el agua freática, de

φρέατα

pozos (12), que han alcanzado los pozos de San Lorenzo y de Irolo a 80 y 98 metros de profundidad, respectivamente. El

(12) Les Eaux Souterraines a l'époque actuelle por A. Daubrée. Tomo I, págs. 99 y 302, París, 1887.

pozo de Axapusco tiene agua a la profundidad de 72.29 metros. El agua es abundante en los pozos indicados y se extrae con bombas o con compresoras. Ya se comprende por lo dicho, que una perforación hecha en Tlanalapan encontraría el agua freática a una profundidad aproximada de 100 metros; que esta capa acuífera no tendrá presión hidrostática; y que no hay causa que justifique la presencia de agua artesiana brotante, ni siquiera ascendente, en este valle secundario. A mayor abundamiento, de las condiciones que pueden llamarse clásicas, y que señala el profesor Chamberlin como indispensables para la existencia de receptáculos acuíferos que proporcionen aguas artesianas (7) y (13), falta la III: "la presencia de una capa impermeable superior a la *región activa*, para impedir el escape hacia arriba, porque el agua bajo la presión hidrostática producida por la diferencia de nivel entre la región activa y la superficie de alimentación, encontraría salida en aquella dirección." La VII es problemática: "la ausencia de cualquier escape para el agua a un nivel más bajo que la boca del pozo que se perfore." Es suficiente con que la III no esté satisfecha para poder asegurar que en Tlanalapan no tendrá éxito una perforación con el fin de obtener aguas artesianas.

Apan y Alcantarillas. — En la cuenca cerrada de Apan se ha encontrado la primera capa impermeable que sirve de lecho al agua freática a relativa poca profundidad. La compañía del Ferrocarril Mexicano ha perforado dos pozos, uno en la estación de Apan y el otro como a 125 metros al Norte del primero, encontrando agua a 52 y a 47 metros respectivamente; el primero proporciona mayor cantidad de agua que el segundo; el agua se extrae por medio de bombas (*) (véase

el corte núm. 6 del pozo de 47 metros). Como a 300 metros de la estación y al Norte, en la orilla de la población de Apan, el Sr. M. García, ex-presidente Municipal de Apan, perforó otro pozo (véase el corte núm. 7) que alcanzó la profundidad de 42 metros, llegando a una corriente de basalto muy duro y quedó suspendida la obra sin encontrar agua. En el rancho de San Rafael, como a 1 kilómetro al NW. de Apan, hay cuatro pozos: tres tienen agua freática y en uno se extrae por medio de aereo-motor. La profundidad del pozo es de 43 metros, pero la superficie libre del agua se encuentra a 33, de modo es que aquí el agua es abundante. En Tlalayote y en San Miguel de las Tunas, el agua freática se encuentra a 30 y 12 metros respectivamente.

Los manantiales de Almoloya, situados en la vertiente occidental de la extremidad austral de la sierra, que como dijimos antes, divide a los Estados de Puebla e Hidalgo, abastecen medianamente a la población de Apan. No todos los años es suficiente el gasto de esos manantiales para las necesidades del pueblo.

Un estudio hidrológico de la cuenca de Apan sería interesante

Yendo de Apan hacia la hacienda de Alcantarillas (véase el perfil núm. 8) en dirección del Sur al Norte, y pasando el parte-aguas de ambas cuencas cerca del rancho de Santa Cruz, se descende a la cañada de Alcantarillas, en donde se encuentra la hacienda de ese nombre. Muy cerca de la finca y al oriente, se encuentran alineados de E. a W. seis manantiales en una extensión de 150 metros. El agua que suministran es abundante. Los cinco primeros, comenzando por el más oriental, están protegidos por brocales altos de mampostería que impiden la medida de sus gastos y temperaturas de sus aguas; estos manantiales alimentan un acueducto cerrado, que es el que abastece en su trayecto a la hacienda de Tultengo, hacienda de San Gerónimo, Texcazongo, pueblo de Tepeapulco, hacienda de San Isidro y el tanque de agua en el escape de San

(13) Las aguas subterráneas en los municipios de Acatlán y Jaltepec, Dto. de Tulancingo, Edo. de Hidalgo, por el Ing. de minas, Vicente Gálvez. Parergones del Instituto Geológico de México. Tomo V. núm. 10, págs. 432-475.

(*) Datos del Sr. Manuel García Iturbe. Inspector de Bombas de la Compañía del F. C. Mexicano. Apizaco.

Isidro (Ferrocarril Hidalgo). El agua de estos manantiales no se emplea para irrigación en ninguno de los puntos señalados. Del manantial más occidental hace uso la hacienda de Alcantarillas; tiene menor gasto que cualquiera de los otros, según me dijeron. Esto no lo pude comprobar. Después de haber medido el gasto del manantial de la hacienda, obtuve 43 litros por minuto, como promedio de siete operaciones; por lo que es de creerse que el gasto del acueducto de Tepeapulco será poco más o menos de 200 litros en un minuto. La temperatura del agua fué de 16°5 C. y la del aire ambiente de 15° C. Estos manantiales brotan en los basaltos que afloran en Alcantarillas; su gasto es constante y no está influenciado por los cambios de estación. La superficie de alimentación de estos manantiales es extensa, comprende la vertiente occidental de la sierrita del Tepozán, cubierta de bosques, y en donde la infiltración es abundante. Desde el momento en que la temperatura del agua es superior a la media anual en la localidad, podemos considerar como ligeramente termales las aguas del manantial de la hacienda de Alcantarillas. (*) La variación del grado geotérmico en distintas localidades es muy pequeña, y bien puede tomarse un aumento de 1° C. para 30 metros de profundidad, aunque hay casos excepcionales de aumentos más grandes de temperatura en relación con las profundidades. Los manantiales de Alcantarillas deben su termalidad a que la profundidad de donde provienen los filetes líquidos que brotan en los basaltos, deben ser de 40 a 50 metros; la existencia de estos manantiales en el fondo de la cañada de Alcantarillas, muy cerca del thalweg y su ligera termalidad hacen suponer dos cosas: que las venas acuíferas que los alimentan pertenecen a un "sistema venoso" (9) ascendente, principal o secundario; y que su emergencia

en ese lugar está en íntima relación con las erupciones basálticas que formaron el cerro de Tultengo. Efectivamente, la línea divisoria de las aguas del rancho de Santa Cruz fué levantada, las rhyolitas que la forman fueron dislocadas y cubiertas por las tobas basálticas del cerro de Tultengo que, al formarse, estableció la separación completa de Apan y Texocomulco en el relieve exterior; y de hecho formó un dique impermeable, una barrera infranqueable para las aguas subterráneas, que hoy hacen su emergencia en el fondo de la cubeta del valle de Alcantarillas. Ya vimos que la barrera de basalto de los cerros de Palpa y de Santa Ana es perfectamente impermeable; que permite la existencia de una capa freática abundante en Apan a un nivel de 50 metros más alto que el nivel de drenaje superficial del valle de Tlanalapan. M. A. Daubrée cita casos en que los esqueletos basálticos forman barreras que detienen la circulación del agua subterránea (12).

Résumen, conclusiones y obras de captación

El valle de Tlanalapan es secundario, alto, tributario hidrográficamente de la cuenca del valle de México; el suelo y subsuelo están formados de rocas volcánicas, terciarias, cuaternarias y recientes. Estas rocas son coherentes y su permeabilidad está localizada en diaclasas y cavidades supercapilares y el rellenamiento del valle se ha hecho con materiales *franca y totalmente permeables*. Estos materiales permeables en los que la infiltración anual puede valuarse en 50.544,000 metros cúbicos, descansan sobre un lecho andesítico impermeable. En las irregularidades del relieve poco pronunciado de este fondo, se encuentra la zona acumulante del agua infiltrada. No existen manantiales al nivel de esta zona acumulante. No hay región activa de los receptáculos acuíferos subterráneos. El agua, al circular en las cercanías de la zona acumulante, lo hace con velocidades muy pequeñas, prácticamente horizontales; *no existe presión hi-*

(*) M. A. Daubrée define como termales los manantiales cuyas aguas tienen una temperatura superior a la media de la localidad, desde 2° c. en adelante.

drostática, y por tanto, ningún filete líquido es ascendente a esa profundidad. *El agua freática debe encontrarse en Tlanalapan a 100 metros de profundidad. Toda perforación hecha en Tlanalapan con el fin de obtener agua artesiana fracasará, porque no existen capas impermeables que forcen al agua que circula en las permeables a conducirse como en tubos o conductos forzados, entre el nivel de afloramiento de los estratos permeables y el punto alcanzado por la perforación.*

El agua freática se encuentra en el valle de Apan, a profundidades que crecen de N. a S., es decir, de la línea divisoria de las aguas entre las cuencas de Apan y Texocomulco a la población de Apan. *El nivel del agua freática en Apan es aproximadamente 50 metros más alto que el nivel de drenaje superficial de Tlanalapan.*

El apéndice austral de la Sierra Madre Oriental, que forma el límite natural entre los Estados de Puebla e Hidalgo y que se interna en Huayacocotla y Zacualtipán, alimenta en sus vertientes occidentales, los manantiales de Alcantarillas y de Almoloya, que pertenecen a las cuencas hidrográficas de Texocomulco y Apan.

Los manantiales de Alcantarillas, tienen una superficie de alimentación extensa que permite una infiltración abundante en los receptáculos acuíferos subterráneos; son de gasto constante, como de 40 litros en un minuto cada uno de ellos, la temperatura de las aguas es como 2° C., superior a la media anual de la localidad; son ligeramente termales y hacen su emergencia en los basaltos, en el fondo de la cubeta del vallecito de Alcantarillas, cerca de la eminencia de Tultengo; pertenecen a un sistema venoso ascendente, y cinco de ellos alimentan el canal de Tepeapulco. En el valle de Alcantarillas se encontrarán, con cualquiera perforación cercana al thalweg, aguas artesianas brotantes a corta profundidad.

En vista del resumen anterior y de las conclusiones que se establecen, es ya fácil aconsejar el mejor medio para proveer de aguas al pueblo de Tlanalapan. Se pre-

sentan desde luego tres soluciones, las dos primeras de orden técnico y la última de índole administrativa, y cuya discusión no es de la competencia del hidrólogo, pero es la más sencilla desde el punto de vista económico.

1.^a Una perforación en el lugar denominado "Lagunita"—al oriente del pueblo de Tlanalapan, como a 1 kilómetro de la población—, entre ésta y la hacienda de San José, proporcionará agua freática en abundancia para las necesidades del pueblo; el pozo alcanzará la profundidad aproximada de 100 metros. La extracción se hará con bomba o compresora. Veámos qué costo alcanza el agua obtenida por este procedimiento:

Deben tomarse en cuenta: Costo de la perforación a 100 metros de profundidad, (*) valor de las máquinas, valor del motor, instalación de las mismas, salario del mecánico, combustibles empleados, lubricantes, accesorios y reparaciones.

Perforación de 8" a 100 metros de profundidad en terreno duro.....	\$ 2,500.00
Motor de gasolina de 16 H.P.	400.00
Bomba de 13 HP.....	800.00
Entubación del pozo con tubo galvanizado 8" y collares.....	979.00
Construcción de la casa de las máquinas.	300.00
Instalación de las máquinas.....	200.00
	\$ 5,179.00

No se considera el rédito de este capital hasta su amortización en 10 años, por ejemplo, y para el valor del agua tendremos en cuenta solamente su extracción:

12 litros de gasolina.....	\$ 2.64
2 litros de lubricantes y estopa.....	0.86
Jornal del mecánico.....	3.00
	\$ 6.50

La bomba trabajará 4 horas diarias y el volumen del agua elevada a 120 metros sobre el fondo del pozo, será de 84,420 litros; de manera que el precio del metro cúbico será de \$0.077 o sea de \$0.08, teniendo presentes las reparaciones que se

(*) Haciendo uso de un dato de la Compañía Perforadora Mexicana (perforación hasta de 8" en terreno duro).

ofrezcan en las máquinas. Esta capacidad de la bomba suministra 100 litros por habitante para la población de Tlanalapan; la potencia de la bomba se calculó para esa capacidad, teniendo en cuenta el rosamiento, derrames, eficiencia, etcétera. Esa capacidad no es exagerada, pues en San Lorenzo e Irolo se obtiene ese volumen sin agotar los pozos; es bien sabido que la capacidad es, dentro de ciertos límites, proporcional al diámetro de la perforación, por eso hemos supuesto un diámetro de 8" igual al del pozo de San Lorenzo. El precio del metro cúbico de agua no ha sido gravado con el rédito del capital invertido, ni tampoco se toma en cuenta el costo de las construcciones subsecuentes: conducción, almacenamiento y distribución del agua. Las ideas anteriores me han hecho comprender la necesidad de tratar en un estudio especial el costo de extracción del agua y el valor que este elemento alcanza en el abastecimiento de una población o en la irrigación.

2.^a Dijimos ya que la cañada de Alcantarillas es una cuenca de aguas artesianas brotantes; toda perforación en ese lugar producirá el agua en cantidad suficiente para abastecer a Tlanalapan, que en diferencia de nivel se encuentra 100 metros más baja que Alcantarillas y a 22 kilómetros en distancia horizontal.

Un socavón de drenaje en el nacimiento de la barranca de San Gerónimo y en el extremo de las corrientes de lava del cerro de Tultengo, a un nivel de 35 a 40 metros más bajo que la altura de los manantiales de Alcantarillas, es decir, localizada esta obra en terrenos de la hacienda de Tultengo y a un nivel más bajo que aquel en donde brotan los manantiales existentes, que como vimos, pertenecen a un sistema ascendente de venas acuíferas, producirá necesariamente una disminución notable en el gasto de esos manantiales, que pueden llegar a desaparecer y el agua subterránea encontrará fácil salida por las obras horizontales de captación, que por otra parte tendrán constantemente agua suficiente; pues el área de alimentación de los manantiales es una

garantía de ello (9). Ya se ve que esta obra, de verificarse, pondría en peligro la existencia de los manantiales de Alcantarillas; ahora bien, supongamos que la obra de captación se ejecuta con un costo parecido al del pozo de que antes hablamos, queda todavía el gasto de un canal de 22 kilómetros de longitud para la conducción del agua; pues el thalweg del arroyo de San Gerónimo no podría utilizarse, porque el agua se infiltraría antes de llegar a su destino. Esa obra es muy costosa, superior a los elementos del Municipio de Tlanalapan, y, sobre todo, repugna a todo espíritu racional *la construcción de un canal que siguiera el mismo trayecto del que ya existe*, y que tiene capacidad suficiente para conducir más agua de la que lleva actualmente. Debemos agregar aquí que en la hacienda de Tetlapaya, se hicieron dos socavones de drenaje para obtener agua potable, y esas obras de captación dieron buenos resultados; se aprovecharon las infiltraciones sobre la vertiente occidental de la sierra mencionada anteriormente.

3.^a—La solución más económica consiste en que el Municipio de Tlanalapan adquiriera el agua que necesite comprándola a Tepeapulco. Del escape de San Isidro a Tlanalapan se tendería una entubación con una longitud de 3 kilómetros.

México, 2 de marzo de 1919.

Heriberto Camacho.

APENDICE

En vista de las razones expuestas en la nota de la página 11, ocurrió al señor Director del Instituto para que en el Laboratorio Químico del Establecimiento, se hicieran las análisis de las rocas que caracterizan la petrografía del valle de Tlanalapan. Las análisis las practicó el señor Prof. D. Carlos Castro, Jefe del Laboratorio.

Muestra núm. 1.—Andesita. Roca de color oscuro, de textura granitoide, con feldespato estriado abundante. La propor-

ción de SiO₂ es de 57.64%, por lo cual se asemeja mucho a las andesitas de Blackford Hills, Escocia (1) en que la proporción de sílice es de 57.53%.

Muestra núm. 2.—Rhyolita alterada. La proporción de SiO₂ la coloca entre los grupos III y IV de rhyolitas potásicas, según F. H. Hatch, (1) pág. 252. Aunque según el análisis, los feldespatos calcosódicos son más abundantes que los de K₂O.

Muestra núm. 3.—Toba rhyolítica. Menos ácida que las rhyolitas, tiene una proporción de SiO₂ de 63.92%.

Muestra núm. 4.—Labradorita. Esta roca, ya descrita en el texto, es la más básica de todos los ejemplares analizados: SiO₂ 56.43% y F. H. Hatch asigna a la labradorita 55.6% p 96.(1)

Núm. 1.—Muestra de andesita, procedente del Cerro de San Simón, Tlanalapan, E. de Hidalgo

Humedad.....	0.32 %
Agua al rojo.....	0.48 „
Si O ₂	57.64 „
Fe O.....	2.84 „
Fe ₂ O ₃	1.51 „
Al ₂ O ₃	22.59 „
Mn O.....	0.37 „
Ca O.....	8.71 „
Mg O.....	1.77 „
Ti O ₂	1.60 „
K ₂ O.....	0.61 „
Na ₂ O.....	1.66 „
	100.11 %

Núm. 2.—Muestra de rhyolita alterada, respaldo de las vetas de cuarzo. Cerro de Lucio, Hacienda de San Pedro Tochatlaco, Tlanalapan, E. de Hidalgo

Humedad.....	2.92 %
Agua al rojo.....	6.09 „
Si O ₂	72.54 „

Fe O.....	0.86 %
Fe ₂ O ₃	3.51 „
Al ₂ O ₃	6.48 „
Mn O.....	0.36 „
Ca O.....	2.11 „
Mg O.....	1.01 „
Ti O ₂	1.87 „
K ₂ O.....	0.69 „
Na ₂ O.....	1.52 „
	99.96 %

Núm. 3.—Muestra de Toba rhyolítica, procedente del Cerro de Xihuingo, E. de Hidalgo

Humedad.....	0.19 %
Agua al rojo.....	1.31 „
Si O ₂	63.92 „
Fe O.....	0.52 „
Fe ₂ O ₃	5.08 „
Al ₂ O ₃	16.86 „
Mn O.....	0.35 „
Ca O.....	6.33 „
Mg O.....	1.17 „
Ti O ₂	1.29 „
K ₂ O.....	0.93 „
Na ₂ O.....	1.94 „
	99.89 %

Núm. 4.—Muestra de Labradorita, procedente del Rancho del Ciprés, Tlanalapan, E. de Hidalgo

Humedad.....	0.26 %
Agua al rojo.....	0.78 „
Si O ₂	56.43 „
Fe O.....	7.26 „
Fe ₂ O ₃	2.02 „
Al ₂ O ₃	18.57 „
Mn O.....	0.27 „
Ca O.....	2.67 „
Mg O.....	7.14 „
Ti O ₂	2.50 „
K ₂ O.....	0.36 „
Na ₂ O.....	1.63 „
	99.89 %

(1) Tex. Book of Petrology by F. H. Hatch. London 1919, pág. 265.

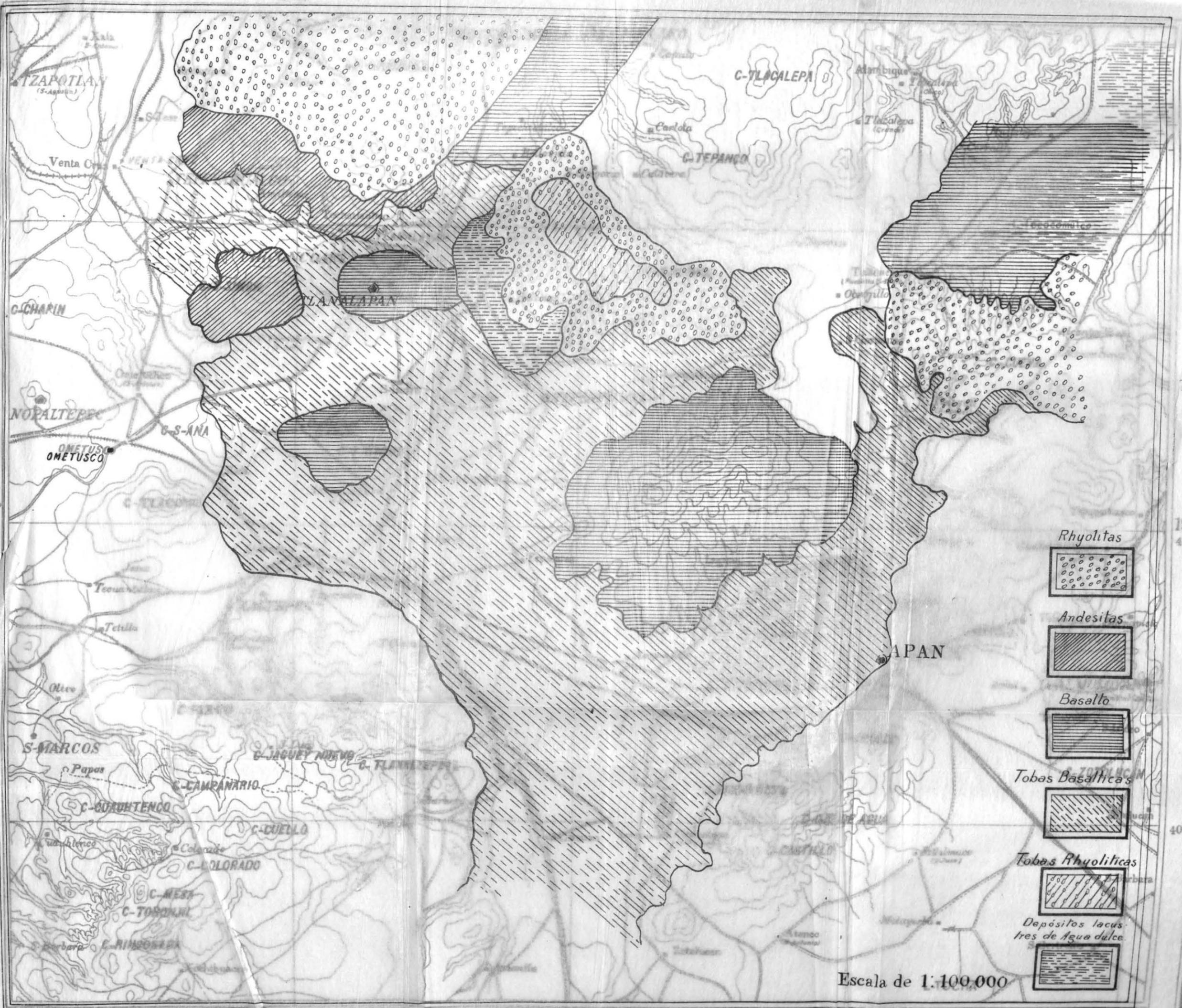
PLANO TOPOGRAFICO
del
DISTRITO DE APAM

— LAMINA N° I. —



© indica manantiales.
A, B, C, D. Línea probable de manantiales.

— Es 1:100000 —



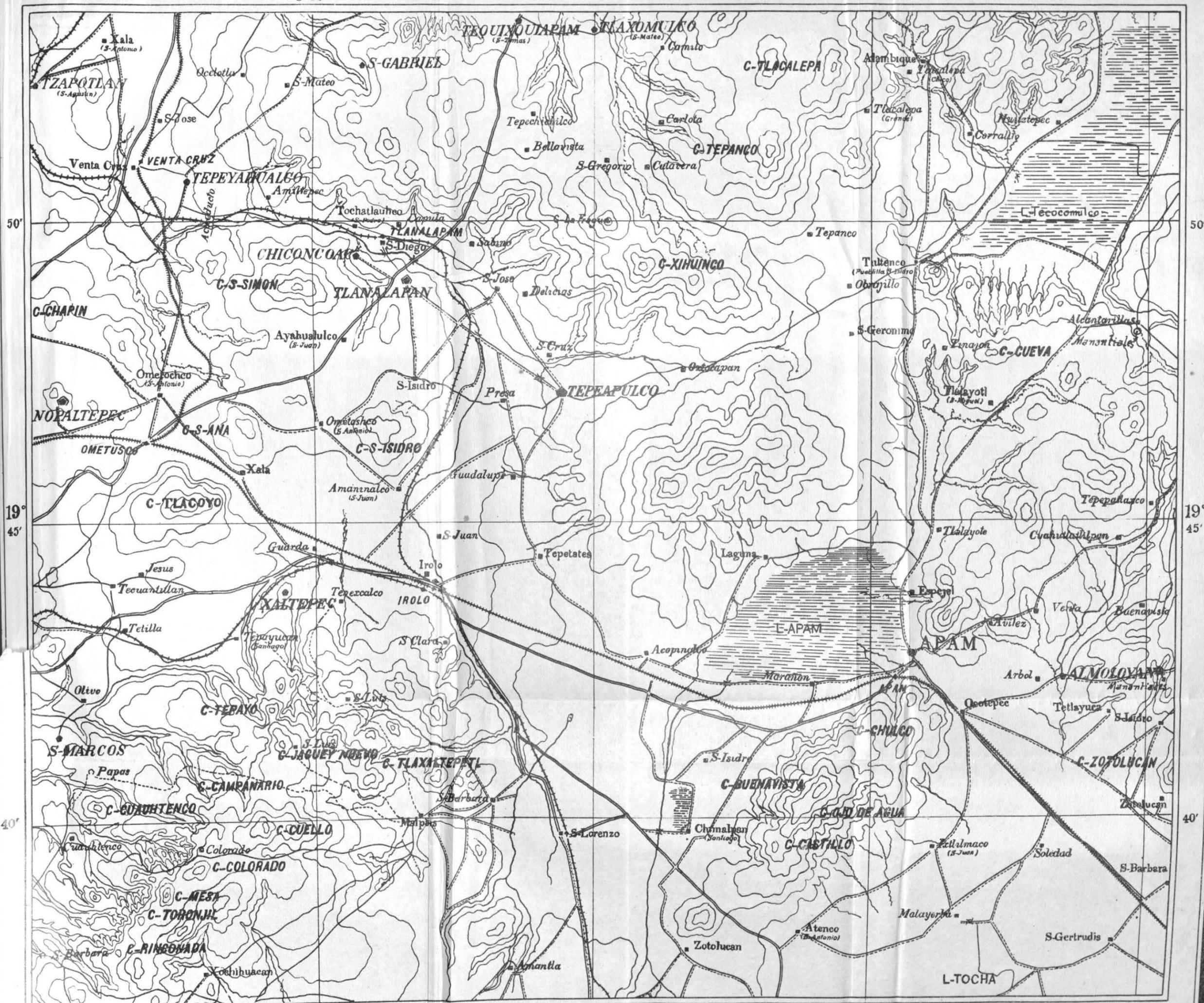
Curvas de nivel: equid. vert.=50 metros.

Escala de 1:100,000

Escala de 1:100 000

0° 30'

40'



50'

50'

19° 45'

19° 45'

40'

40'

0° 30'

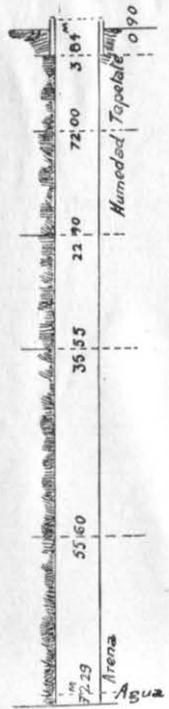
Curvas de nivel: equid. vert. = 50 metros.

40'

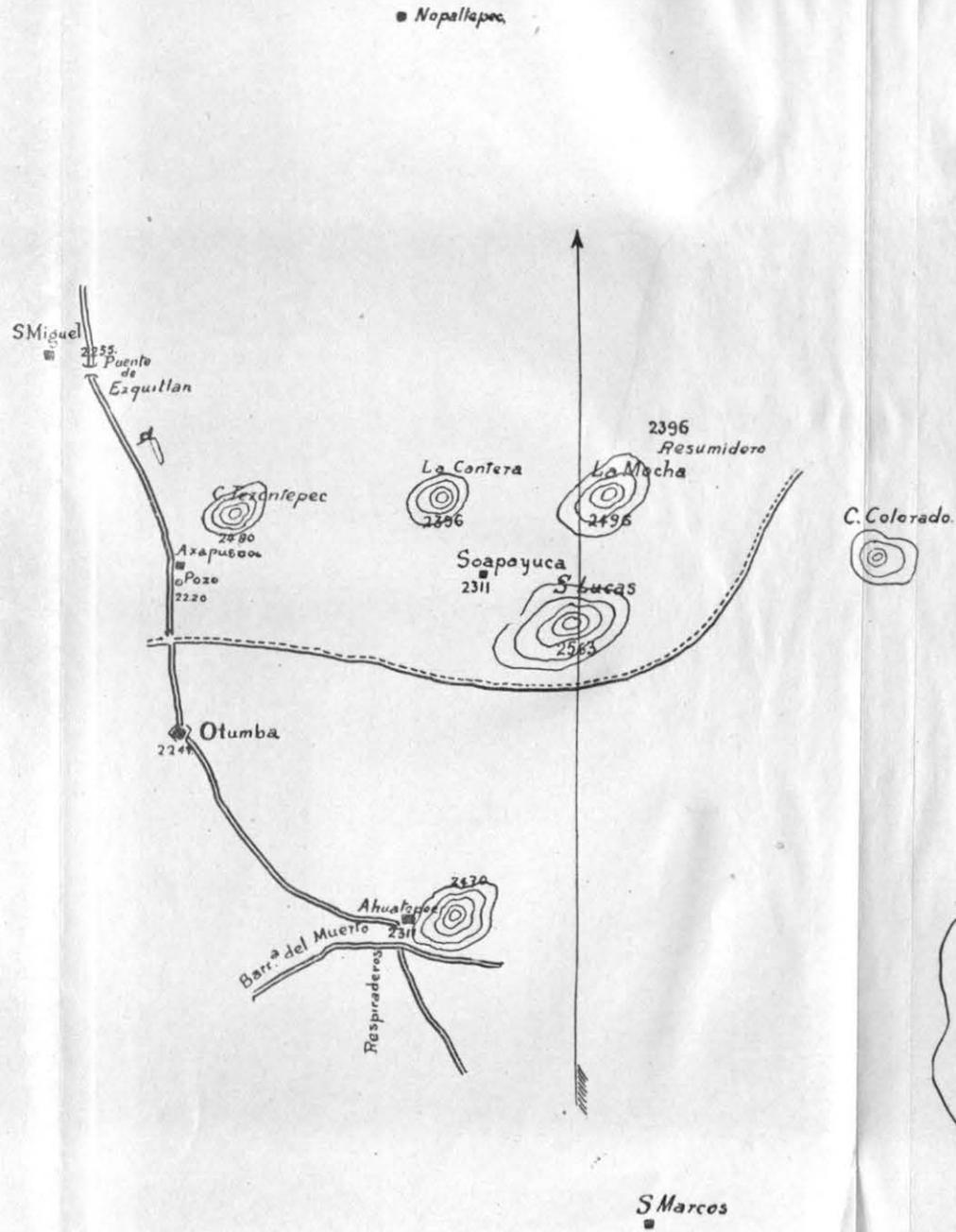
Escala de 1: 100 000



Pozo de Axapusco Corte.



Escala 1:800



Escala apr 1:100 000





Figure 1

Contours



Figure 2

Figure 3