

---

---

## HIDROLOGIA GENERAL DE LA REGION

---

Indicadas ya las rocas que afloran en las serranías de las Cruces y el Ajusco, al Sur-Poniente y Sur de la cuenca de México, conocido el carácter físico de cada una de esas rocas, así como las extensiones aproximadas de sus respectivos afloramientos, pueden ya clasificarse éstas rocas según su permeabilidad relativa, y puede también limitarse la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan en parte por los manantiales de la Magdalena, de Eslava, de Tlalpan, de Xochimilco y de Chalco.

En la región de que me ocupo afloran rocas coherentes, poco coherentes, é incoherentes; y por lo tanto, hay en esa región rocas compactas, porosas, y muy porosas. Como rocas coherentes ó compactas, figuran en el borde meridional de la cuenca de México, por orden de su antigüedad relativa: la andesita de hornblenda, la andesita de hornblenda é hyperstena, y el basalto. Como rocas poco coherentes ó porosas, se hallan en el mismo borde: las brechas pomosas, las tobas arenosas y las detriticas, y también las arcillas arenosas ó mezcladas con tierra vegetal, depósitos formados por el agua en las depresiones del terreno. Como material incoherente ó muy poroso hay en las mismas serranías: cenizas y arenas volcánicas, en montículos ó en lechos delgados, y aluviones constituídos por matatenas de andesita principalmente.

Entre las rocas compactas que acabo de mencionar, hay que establecer una división fundada en el carácter físico que presentan esas rocas en el terreno estudiado. En efecto: la andesita de hornblenda del Ajusco está muy poco agrietada; en la andesita de hornblenda é hyperstena de Eslava y la Magdalena, se observan muchos relices, planos de separación éstos que forman dos sistemas como dije antes, y de los cuales el de rumbo medio 80° N.W. está bastante desarrollado; y por último, el basalto en varias partes de su afloramiento es esponjoso, ó tiene muchas cavidades, ó presenta el aspecto fragmentario por estar agrietado en muchas direcciones. Según esto, entre las rocas compactas de la región hay una casi impermeable, por estar muy poco agrietada, la andesita de hornblenda; y dos de permea-

bilidad localizada en las grietas que las cortan ó en las cavidades contenidas en ellas, y son estas dos últimas rocas la andesita de hornblenda é hyperstena y el basalto. Estas rocas, por no ser porosas, no permiten la infiltración y la circulación del agua en toda su masa, sino que el agua sólo puede infiltrarse y circular en el interior de esas rocas, por las grietas que las cortan, ó por las cavidades que contienen, espacios vacíos todos éstos en los cuales queda localizada la permeabilidad de la roca, ó sea, la propiedad de permitir la circulación de líquidos ó gases en su interior. En la andesita de hornblenda é hyperstena no existen cavidades más ó menos grandes, como se hallan en el basalto, sino que esa andesita está agrietada solamente. Por lo tanto, la circulación del agua es más fácil y por consiguiente más activa, en las cavidades amplias, supercapilares del basalto, que en los conductos estrechos más ó menos capilares que hayan quedado vacíos en las grietas y relices de la andesita de hornblenda é hyperstena. Según esto puede decirse que, es mucho más permeable el basalto de la serranía del Ajusco, que la andesita de hornblenda é hyperstena que aflora en la zona de unión de la sierra de las Cruces con la del Ajusco.

Como materiales porosos, es decir, materiales que contienen espacios vacíos entre las partículas que los constituyen, he citado á las brechas pomosas, á las tobas arenosas y á las detríticas, y también á las arcillas arenosas mezcladas con tierra vegetal. En todos estos materiales hay espacios vacíos, poros, que permiten la infiltración del agua y que ésta circule en su interior. Como esos poros se encuentran en toda la masa de los referidos materiales, el agua circula en el interior de ellos por todas partes, no solamente por las grietas, es decir, que esa circulación no está circunscrita, no está localizada en las grietas ó en las grandes cavidades, sino que se verifica por todas partes, sin obstáculos, sin interrupciones, razón por la cual he llamado permeabilidad continua á la que tienen las rocas porosas.<sup>1</sup>

En las brechas, y principalmente en las tobas mencionadas, los poros, ó espacios contenidos en ellas, son muy pequeños, capilares ó subcapilares; y por lo tanto, aunque la capacidad de absorción de esas brechas y tobas es considerable, aunque su porosidad es grande, su permeabilidad es relativamente pequeña, porque el agua circula con dificultad por esos espacios tan pequeños, por esos poros capilares, y la circulación del agua se verifica entonces de acuerdo con las leyes de la capilaridad y no conforme á las leyes de la hidrostática. En vista de esto, es fundado decir que, las brechas y tobas de la región en estudio son menos permeables que los basaltos esponjosos, cavernosos y agrietados del Ajusco; pero son más permeables que las andesitas de la misma región. En cuanto á la permeabilidad relativa entre las brechas pomosas, las tobas arenosas y las tobas detríticas de grano fino, debo indicar que: las brechas pomosas y las tobas arenosas

1 J. D. Villarelo. Hidrología interna de los alrededores de Cadereyta Méndez. Parergones del Instituto Geológico de México. Tomo I, núm. 6, pág. 182.

mencionadas en este estudio son más permeables que las tobas detríticas de grano fino; porque las primeras tienen poros menos capilares que las últimas, y por lo mismo, es más fácil y rápida la circulación del agua en el interior de las brechas pomosas y tobas arenosas de la región estudiada, que en el interior de las tobas detríticas de grano fino que se hallan en la misma región.

La arcilla y también la marga son materiales casi impermeables, pues aunque absorben grandes cantidades de agua, su poro es tan pequeño que la circulación de esa agua en su interior es casi nula. Cuando la marga ó la arcilla están mezcladas con arena, van siendo menos impermeables á medida que aumenta la cantidad de arena. Así, cuando la arcilla se encuentra en la región de que me ocupo transportada por el agua, mezclada con arena y tierra vegetal, y depositada en las depresiones más ó menos grandes del terreno, ó en las faldas poco inclinadas, puede decirse que constituye un material más permeable que una toba de grano fino. En cambio, cuando la arcilla no está mezclada con arena, sino que casi pura se halla sobre la andesita de la región, cubriendo á las grietas de esta roca, entonces puede considerarse como un material casi impermeable, y que impide la entrada ó la salida del agua por las grietas de la andesita que estén cubiertas con la mencionada arcilla.

Como materiales incoherentes muy porosos, he citado en la región estudiada: los aluviones y las cenizas y arenas volcánicas, depósitos que ocupan grandes superficies. La circulación del agua por estos materiales es muy fácil y rápida por existir en ellos multitud de espacios vacíos, muchas veces supercapilares, lo cual hace que la permeabilidad de estos depósitos sea continua y bastante considerable. Sin embargo, esta permeabilidad no es igual en todas partes del mismo material incoherente, sino que varía con la forma y las dimensiones del grano en los montículos ó lechos de arena, y con el tamaño y forma de las matatenas en los bancos de aluvión, siendo la permeabilidad relativamente menor, á medida que son más pequeños los granos de arena, ó los elementos que constituyen el aluvión.

Como dije antes, en los depósitos incoherentes del Ajusco alternan lechos de arena de grano diferente y por lo mismo de permeabilidad desigual. En estos depósitos, aunque la permeabilidad es continua, es decir, aunque la circulación del agua se verifica en su interior por todas partes, sin embargo, por unos lugares esta circulación es más activa, más rápida, porque en ellos son menos capilares los espacios vacíos y por este motivo se forman dentro del depósito de arena series de venas acuíferas, ó sea conductos irregulares por los cuales se verifica de preferencia la circulación de las aguas subterráneas.

En el relleno del fondo de la cuenca de México alternan de diferentes maneras capas casi impermeables con otras poco permeables, constituídas respectivamente por depósitos arcillo-margosos y por arcillas ó margas arenosas. Intercaladas en las capas anteriores se encuentran á diferentes

profundidades depósitos muy permeables, constituídos por arena ó matateñas de andesita por lo general.

Resumiendo el contenido de los párrafos anteriores, pueden agruparse los materiales que constituyen el relleno del fondo y el borde meridional de la cuenca de México, por orden ascendente de su permeabilidad relativa, como sigue: arcillas y margas, andesita de hornblenda, andesita de hornblenda é hyperstena, tobas detríticas, arcillas y margas arenosas, brechas volcánicas, tobas arenosas, basaltos, arenas y aluviones.

Conocida ya la permeabilidad relativa de las distintas rocas que se encuentran en la región estudiada y la topografía del terreno, es fundado decir ahora que, el agua que sale por los manantiales del río de la Magdalena, por los de la hacienda de Eslava, y por los que se hallan en los alrededores de Tlalpan, Tepepan, Xochimilco y Chalco, proviene de las lluvias caídas en las vertientes septentrionales del macizo montañoso del Ajusco, y en la zona de unión de este último con la sierra de las Cruces. En efecto, como dije en otro lugar, el núcleo de las sierras del Ajusco y de las Cruces está constituido por la andesita de hornblenda, y como esta roca es casi impermeable en la región de que me ocupo, ese núcleo de andesita de hornblenda de las sierras mencionadas es una barrera subterránea casi impermeable, que impide pasen para el Sur las aguas infiltradas en las vertientes Norte de esas serranías, y que no permite á las aguas infiltradas en las vertientes del Sur, que en su circulación subterránea salgan por manantiales situados en las vertientes Norte de las mismas sierras. Según esto, el núcleo andesítico casi impermeable de las sierras del Ajusco y las Cruces, es una zona que divide á las aguas subterráneas, de tal suerte, que sin obras artificiales, el agua infiltrada en cada vertiente sólo puede salir de nuevo al exterior por la misma vertiente y no por la opuesta. En otros términos puede decirse que, en el borde meridional de la cuenca de México hay un núcleo de andesita de hornblenda que debe considerarse como la zona divisoria de las aguas en su circulación subterránea, zona casi impermeable que separa á las aguas que por el Norte bajan y salen en parte al exterior por los manantiales de la Magdalena, Tlalpan, Xochimilco y Chalco, de las que por el Sur descienden y brotan en parte por los manantiales de Cuernavaca, las Fuentes de Chapultepec (E. Morelos), y Jiutepec.

En vista de lo expuesto es fundado asegurar que, la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos que en parte desaguan por los manantiales de la Magdalena, Tlalpan, Xochimilco y Chalco, está limitada á las vertientes que hacia el Norte descienden del macizo montañoso del Ajusco, y de la zona que he llamado de unión entre éste último y la sierra de las Cruces. La cantidad de agua que salga por los manantiales que mencioné antes, será proporcional, por lo tanto, á la cantidad de agua que se infiltre en la superficie de alimentación que acabo de indicar.

Aceptado lo anterior, se concluye que, la circulación subterránea de las aguas en las vertientes del Ajusco tiene que ser más bien superficial que

profunda. En efecto, el agua que se infiltre en las referidas faldas no puede descender verticalmente á grandes profundidades, sino que cuando más llegará hasta la andesita de hornblenda que constituye el núcleo de esa serranía, y en seguida descenderá sobre ella siguiendo la pendiente de esta última roca.

Como dije antes, el edificio basáltico del Ajusco se apoya sobre las antiguas vertientes andesíticas de esa serranía; y como la andesita de hornblenda que constituye á esas vertientes es casi impermeable, la circulación subterránea de las aguas en casi todo el macizo montañoso del Ajusco tiene lugar únicamente en el interior de ese edificio basáltico, es decir, en el interior de los conos y corrientes de basalto, y en el interior de los depósitos cineríticos y tobosos que se apoyan sobre los referidos basaltos. Por lo tanto, la circulación subterránea del agua en las faldas del Ajusco tiene lugar únicamente en una zona superficial relativamente poco gruesa, bastante inclinada, y que se apoya sobre la andesita impermeable de las antiguas vertientes de ese macizo montañoso.

La comprobación de las ideas ya expuestas, relativas á la circulación más bien superficial que profunda de las aguas que se infiltran y descienden subterráneamente en las vertientes del Ajusco, la proporciona un hecho muy interesante, cual es: la temperatura del agua que sale por todos los manantiales de la región estudiada. En efecto, es bien sabido que, cuando el agua en su circulación subterránea desciende á bastante profundidad se calienta, y al salir por los manantiales tiene una temperatura notablemente superior á la media del lugar en donde se hallan los manantiales. En cambio, cuando el trayecto seguido por las aguas en el subsuelo es más bien superficial que profundo, al salir esas aguas por los manantiales tienen una temperatura muy cercana de la media local. Pues bien, el agua que sale por todos los manantiales de la región descrita, es fría, su temperatura media varía entre 10 y 14° C., es decir, que aproximadamente es igual á la temperatura media del lugar, lo cual prueba que el trayecto que siguen esas aguas en su circulación subterránea, es más bien superficial que profundo.

Por las razones ya indicadas, considero fundado decir que, el núcleo andesítico de la sierra del Ajusco separa á las aguas subterráneas que por el Norte bajan para la cuenca de México, de las que por el Sur descienden hacia Cuernavaca y Jiutepec; y fundado en los mismos razonamientos puedo decir que, los contrafuertes de andesita de hornblenda que he llamado La Magdalena á Zacatepec y Tehuehue á Xochitepec, contrafuertes que se desprenden de la sierra del Ajusco para el Norte, dividen á la vertiente septentrional de esta serranía en tres zonas diferentes de circulación de aguas subterráneas. En efecto, los contrafuertes mencionados, de andesita de hornblenda, siendo casi impermeables impiden que las aguas infiltradas en la zona comprendida entre ellos dos, pase en su circulación subterránea para las zonas que se hallan, una al Oriente del contrafuerte Tehuehue—

Xochitepec, y otra al Poniente del contrafuerte La Magdalena-Zacatepec; é impiden también que el agua infiltrada en estas dos últimas zonas pase subterráneamente para la zona central comprendida entre los dos mencionados contrafuertes andesíticos. (Véase lám. XIII.) Esta separación en zonas diferentes de circulación de las aguas en el subsuelo, obliga á hacer un estudio separado de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en cada una de esas zonas, y á dividir en secciones la superficie total de alimentación de estos receptáculos, superficie total limitada ya aproximadamente de la manera que indiqué en algunos de los párrafos anteriores. Teniendo en cuenta lo que acabo de decir, y con la mira de proceder en mayor orden y hacer más claras las descripciones, creo conveniente continuar este estudio hidrológico dividiéndolo en tres partes, para estudiar por separado cada una de las zonas en que divido la región ya descrita, y que son: zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava; zona La Magdalena, Tlalpan; y zona Cuautzín, Teuhctli, Xochimilco. (Véase lám. XIII.) Después me ocuparé en estudiar la circulación subterránea de las aguas en la parte Sur de la planicie de México, indicaré la manera de aumentar el caudal de agua que circula en el subsuelo de las zonas estudiadas, y recomendaré algunas obras de captación.

#### ZONA DEL RIO DE LA MAGDALENA Y HACIENDA DE ESLAVA.

En la zona que he llamado del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, el subsuelo está constituido por la andesita de hornblenda é hyperstena, que por estar agrietada puede considerarse como roca de permeabilidad localizada en las grietas referidas. Esta roca aflora con especialidad en los lugares de bastante inclinación, en los bordes acantilados de las barrancas principalmente; pero en las depresiones del terreno, en las faldas de poca pendiente, y en las planicies escalonadas que se hallan en esa zona, la andesita está cubierta con un revestimiento de material arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal. Este revestimiento es permeable, como dije antes, y tanto más á medida que la arcilla está mezclada con mayor cantidad de arena. En otros lugares, la andesita de hornblenda é hyperstena está cubierta con un revestimiento de arena, material en su mayor parte arrojado por los volcanes basálticos de la región, y transportado y sedimentado por el viento y las aguas. Este material incoherente, muy permeable, se encuentra principalmente en los alrededores del lugar llamado el Ocotl, en las faldas de los cerros Coaxoayaque, el Cochinito, Cieneguillas, San Miguel y el Arenal.

Constituída la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava por los materiales permeables que acabo de mencionar, puede considerarse todo ese terreno como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos; pero como no todos esos materiales tienen el mismo coeficiente

de infiltración, no toda esa zona es igualmente interesante considerada como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos.

La andesita de hornblenda é hyperstena, siendo una roca de permeabilidad localizada, no permite la infiltración del agua sino por los espacios vacíos contenidos en las grietas que la cortan. Según esto, no puede considerarse como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos, á toda la superficie de terreno ocupada por el afloramiento de esta andesita, sino que esa superficie de alimentación queda reducida á la extensión que ocupan los afloramientos de los espacios vacíos contenidos en las grietas que cortan á la andesita mencionada. Si á esto se agrega, que la arcilla que resulta de la alteración de la roca "in situ," obstruye á veces á las grietas é impide por ser impermeable, que el agua penetre por esas grietas, se comprende lo muy reducida que queda la superficie de alimentación en los afloramientos de esa andesita de hornblenda é hyperstena. Pero aún hay más: cuando estos afloramientos se hallan en lugares de mucha pendiente, por los cuales pasan con gran velocidad las aguas corrientes superficiales, la infiltración de estas aguas es muy pequeña en esas condiciones. En cambio, cuando sobre las rocas de permeabilidad localizada en las grietas que las cortan, existe un depósito de material poroso que permita la infiltración fácil de las aguas superficiales, entonces, el agua infiltrada en el depósito poroso pasa á los espacios vacíos contenidos en las grietas de las rocas macizas, y circula en el interior de éstas una cantidad de agua muy superior á la que se infiltra en las mismas rocas agrietadas, cuando éstas no tienen un revestimiento de material poroso, sino que afloran en la superficie del terreno.

En la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, en unos lugares aflora la andesita agrietada y en otras partes esta andesita está revestida, como he dicho, con un depósito arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal. Según esto, y de acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior, la superficie ocupada por el afloramiento de la andesita debe considerarse de poca importancia relativa como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos; y es de mucho mayor importancia como superficie de alimentación de los referidos receptáculos, la extensión de terreno ocupada por los depósitos arcillo-arenosos mezclados con tierra vegetal, que se apoyan sobre la andesita referida. Es decir, que el tanto por ciento de infiltración de las aguas superficiales es mucho mayor en estos depósitos, que en los afloramientos de andesita; y como la arena es material muchísimo más permeable que las arcillas arenosas, el tanto por ciento de infiltración de las aguas superficiales es muchísimo mayor en las arenas que en los mencionados depósitos arcillosos. Por lo tanto, la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos existentes en la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, puede dividirse en tres partes, que en orden decreciente de su importancia relativa, son las siguientes: superficie ocupada por el revestimiento de arena más ó menos fina que se

halla en los alrededores del Ocotal, y cerros Coaxoyaque, Cochinito, Cienguillas y San Miguel; superficie ocupada por los depósitos de arcilla arenosa mezclada con tierra vegetal, que se encuentran en la mayor parte de los cerros andesíticos de esa zona, tanto en los montes de la Magdalena como en los de San Nicolás y Eslava; y por último, la superficie ocupada por los afloramientos de andesita de hornblenda é hyperstena que existen en la región, principalmente en las partes de mayor pendiente, y en los acantilados de los cerros de la Magdalena y Eslava.

El tanto por ciento de infiltración de las aguas corrientes superficiales en cada una de las tres partes en que divido la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, en la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, puede fijarse de una manera aproximada en las condiciones locales de la región, como sigue: en la superficie ocupada por el material incoherente, arenas, cenizas, etc., se infiltra aproximadamente el 50 por ciento del volumen de agua recibido por esa superficie; en el terreno ocupado por el depósito arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, se infiltra el 20 por ciento más ó menos, y la infiltración es muy pequeña en la superficie ocupada por los afloramientos andesíticos, y principalmente en los lugares en que la andesita está cubierta por arcilla sin mezcla de arena, arcilla que resulta de la alteración de esa roca "in situ."

En la andesita de hornblenda é hyperstena de la zona á que me estoy refiriendo, el sistema de grietas mejor desarrollado es, como he dicho, el que tiene 80° N.W. de rumbo medio; y como las barrancas en esa zona y en general los cortes principales del terreno, son allí de rumbo 45° N.E. aproximadamente, y en otros lugares este rumbo es casi Norte-Sur, todas las barrancas de esa zona cortan oblicua ó normalmente á las grietas principales que surcan á la referida andesita. Por los espacios vacíos contenidos en estas grietas, circulan las aguas en su trayecto subterráneo, formando venas acuíferas dentro de algunas de esas diaclasas ó fracturas que surcan á la andesita; y como estas diaclasas están cortadas por las barrancas, el agua subterránea, que siempre sigue los trayectos que oponen menor resistencia á su circulación, tiende más bien á salir al exterior por las barrancas que cortan á las diaclasas, que á continuar descendiendo por trayectos más ó menos capilares contenidos en las referidas grietas. Además, estas últimas á la profundidad van desapareciendo, los espacios vacíos contenidos en ellas van siendo más reducidos; y por lo tanto, la circulación del agua en el interior de la roca va siendo más lenta, á la profundidad se verifica por conductos más limitados, y la permeabilidad localizada de la roca va siendo menor. Esta disminución en la permeabilidad de la andesita mencionada, al aumentar la profundidad, ocasiona que una gran parte del agua infiltrada en esa roca siga trayectos subterráneos más bien horizontales que verticales, pues en estos últimos la circulación va siendo más lenta y difícil, y en los primeros es más fácil y más rápida, relativamente. Así, el agua que se infiltra en la parte superficial de la andesita, en cantidad muy superior



á la que puede circular en las partes más profundas de la misma roca, se acumula en los espacios vacíos contenidos en las grietas de la andesita, diaclasas estas que son más abundantes y más amplias en las partes superficiales que en las profundas de la misma roca. El agua acumulada en las grietas, y que no puede descender sino con mucha lentitud, se va extendiendo horizontalmente por los espacios vacíos que encuentra en las mismas diaclasas, el nivel del agua va subiendo, y al fin sale al exterior esta agua en los lugares en que las barrancas cortan normal ú oblicuamente á las grietas por las cuales circulan las aguas subterráneas en la andesita de esa región.

Según lo anterior, los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita de hornblenda ó hyperstena de la zona del río de la Magdalena y de la hacienda de Eslava, están constituídos por los espacios vacíos existentes en las grietas que surcan á esa roca eruptiva, espacios que forman una red de venas más ó menos irregulares y contenidas en cada uno de los tramos de roca más ampliamente fracturada. En los tramos en que la andesita no está agrietada, ó que las grietas son subcapilares, no existen esos espacios vacíos, y en estos tramos no pueden circular aguas en el interior de la roca. Según esto, los sistemas venosos anteriores son independientes unos de otros, están localizados en los tramos de roca más ampliamente fracturada, en donde las grietas son supercapilares, y están separados por tramos más ó menos anchos de roca compacta ó muy poco agrietada. Estos sistemas venosos supercapilares en la superficie, van siendo más ó menos capilares y de menor importancia relativa al aumentar la profundidad.

De acuerdo con lo anterior, puede decirse que en los sistemas venosos acuíferos subterráneos que acabo de mencionar, hay dos clases de circulación de agua: una que es bastante importante, relativamente rápida, más bien horizontal que vertical, y que tiene lugar en la parte superior de los referidos sistemas venosos; y otra menos importante, lenta, descendente, y que se verifica en la parte profunda de los mismos sistemas venosos acuíferos. Esta parte profunda no puede considerarse como pasiva, pues el agua circula en ella y desciende aunque con lentitud; pero tampoco es una región de alimentación de manantiales cercanos, sino que debe considerársele más bien como una zona de retención de las aguas, ó región acumulante, de la cual sólo con obras artificiales puede extraerse el agua en esa región. Esta zona acumulante comienza al nivel inferior de los manantiales y continúa á la profundidad. Según esto, en los receptáculos acuíferos subterráneos que acabo de mencionar, no se encuentra un fondo impermeable al nivel inferior de los manantiales, sino otra cosa que conduce al mismo resultado: se halla un nivel de agua que desciende con mucha lentitud. Esta lentitud en el descenso del agua á ese nivel, impide, como lo haría un fondo casi impermeable, que el agua infiltrada en gran cantidad continúe su descenso fácil y rápido, y la obliga á salir en su mayor parte al exterior por los manantiales situados á ese nivel. Es decir, el agua se infiltra por

las grietas amplias de la andesita, ya sea directamente ó por intermedio, como he dicho, del revestimiento incoherente ó poco coherente que la cubre, y desciende con rapidez relativa por la parte superior de los sistemas venosos acuíferos mencionados, parte que constituye las regiones de alimentación y activa de los manantiales; y continúa en este descenso tendiendo siempre á salir de nuevo al exterior por manantiales situados á distintos niveles, hasta que llega á una zona en la que ya no puede descender sino con gran lentitud, lo cual la obliga á salir al exterior á ese nivel, que debe considerarse como el nivel inferior de los manantiales.

Aceptando la forma que he indicado para los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita de hornblenda é hyperstena de la zona de que me ocupo, y aceptando también las explicaciones que he dado, relativas á la circulación del agua en cada una de las diferentes partes de esos receptáculos se concluye que, el agua que sale por los manantiales del río de la Magdalena y de la hacienda de Eslava, sigue un trayecto subterráneo relativamente corto y más bien horizontal que vertical profundo, es decir, que los manantiales se hallan á corta distancia y no muy abajo de la superficie de terreno en donde se infiltran las aguas que salen por los referidos manantiales.

Las ideas antes expuestas, están fundadas en los siguientes hechos observados: situación de los manantiales, independencia en el régimen de estos últimos, variabilidad en su gasto é influencia inmediata ejercida sobre este gasto por las lluvias cercanas; y por último, temperatura del agua que sale por los mismos manantiales. Estos hechos de observación serán el objeto de los siguientes párrafos.

Los manantiales, ó sean los orificios de desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita de hornblenda é hyperstena de la zona de que me ocupo, se encuentran en las barrancas ó cortes del terreno que tienen como rumbo medio  $45^{\circ}$  Norte-Oriente, ó son Norte-Sur. Como ejemplos puedo citar á los principales manantiales que se hallan en la hacienda de Eslava, y que son los siguientes. En las vertientes Norte del cerro llamado Las Regaderas, al Poniente de Monte Alegre y á una altura de 3,400 metros, hay varios manantiales en dos de las cortaduras Norte-Oriente del mismo cerro. En la barranca que baja de Monte Alegre al Sauco, está el manantial de la Escondida á 3,190 metros de altura, situado en las grietas de la andesita. En la barranca de la Leona está el manantial de este nombre, situado también en grietas de la andesita. En la barranca de Atongo hay otros manantiales insignificantes. Al Sur-Poniente de Viborillas, en una barranca también de rumbo Norte-Oriente, hay varios pequeños manantiales á 3,450 metros de altura. En la barranca de la Magdalena, del Campanario para abajo, en donde tiene rumbo medio de  $45^{\circ}$

1 J. D. Villarelo. Hidrología interna de los alrededores de Cadereyta Méndez. Parergones del Instituto Geológico de México. Tomo I, núm. 6, pág. 184.

Norte-Oriente, y en barranquillas laterales con rumbos Norte-Oriente ó Norte-Sur, hay varios manantiales en la andesita, como son los siguientes: El Campanario, San Miguel, Casas Viejas, La Cerería, La Mina, Mal Paso, El Rincón, los de Acupilco, Coajomulco, etc. Las barrancas anteriores, al cortar oblicua ó normalmente, á las grietas principales de la andesita, permiten la salida del agua subterránea por los manantiales situados en esas grietas y á distintas alturas. La presencia de los manantiales en esos tramos agrietados de la andesita, indica que el agua circula subterráneamente por esas grietas, y por lo mismo es fundado decir que, los espacios vacíos existentes dentro de estos tramos agrietados, constituyen á los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita, receptáculos éstos que puede asegurarse son independientes unos de otros, fundándose en los siguientes hechos.

En la vertiente Norte del cerro Las Regaderas, al Poniente de Monte Alegre, hay varios manantiales casi á la misma altura; y sin embargo sólo por tres de éstos sale agua todo el año, y por todos los otros brota agua en tiempo de lluvias, únicamente. Lo mismo se observa en algunos de los grupos de manantiales situados en las grietas de la andesita en el río de la Magdalena. Además, el volumen de agua que sale por los manantiales del cerro Las Regaderas es mucho mayor que el de los manantiales La Leona, La Escondida, El Campanario, etc., y los primeros están mucho más altos que los segundos, pues los de Las Regaderas se hallan á 3,400 metros de altura, el manantial del Campanario á 3,300 metros y el de La Escondida está á 3,190 metros solamente. Como todos los manantiales que acabo de mencionar se hallan en las grietas de la andesita, si éstas estuvieran unidas, el régimen de manantiales muy cercanos sería el mismo, y por los manantiales más bajos saldría mayor cantidad de agua que por los situados á mayor altura; pero como esto no sucede sino que los hechos observados son enteramente contrarios, es fundado asegurar que: las grietas de la andesita no están todas unidas; y por lo mismo, los receptáculos acuíferos subterráneos constituídos por los espacios vacíos contenidos en estas grietas no están unidos, sino que son receptáculos independientes unos de los otros.

El gasto de todos los manantiales situados en la andesita de la zona que estudio, es muy variable, mucho mayor en tiempo de lluvias que en las secas; y por varios de ellos sólo sale agua poco después de las grandes precipitaciones acuosas. Estas diferencias muy notables en el gasto de los manantiales referidos, pude apreciarlas el año 1896, cuando medí el volumen de agua que salía por cada manantial en distintos meses y en diferentes condiciones. Además, en la mayor parte de esos manantiales, tanto en los de la hacienda de Eslava como en los del río de la Magdalena, del Campanario para abajo, se observa un aumento muy notable en su gasto, poco tiempo después de las grandes precipitaciones acuosas cercanas. Todos estos hechos sirven de fundamento á las ideas que indiqué antes, relativas al trayecto subterráneo relativamente corto que siguen las aguas en la zona

de que me ocupo, desde su infiltración en el terreno hasta su salida al exterior por los manantiales. En efecto, la velocidad con la cual circula el agua en el subsuelo, depende principalmente de la presión hidrostática y de la amplitud de los conductos por los cuales tiene lugar esa circulación. Cuando estos conductos son supercapilares, la velocidad es mucho mayor que cuando son capilares ó subcapilares, pues en estos últimos casos es muy notable la resistencia que experimenta el agua en su circulación subterránea, debido á la atracción molecular que tiende á equilibrar á la gravedad. En el caso de que me ocupo, el agua circula por conductos más bien capilares que supercapilares, contenidos en las grietas de la andesita de hornblenda é hyperstena, y por lo mismo no es muy grande la velocidad con la cual puede circular el agua en el interior de esta roca. Sin embargo, se observa, como acabo de indicar, que algunas horas después de una abundante precipitación acuosa cercana, aumenta notablemente el gasto de varios de los manantiales mencionados; luego es fundado asegurar que, es relativamente corto el trayecto que sigue el agua dentro de las grietas de la andesita, desde su infiltración hasta su salida al exterior por los manantiales, es decir, que estos últimos no están muy distantes de la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por los referidos manantiales. Este corto trayecto subterráneo que siguen las aguas por las grietas de la andesita, está comprobado también por la variabilidad del gasto de los manantiales, pues si éste trayecto fuera mucho mayor, sería mayor por lo tanto el espacio que podría llenarse con el agua infiltrada, y esta mayor cantidad de agua contenida en la región activa del receptáculo acuífero subterráneo, compensaría en parte la falta de infiltración en cierta época del año, y tendería á normalizar el gasto de esos manantiales.

Como dije ya, la temperatura del agua que sale por un manantial es un dato muy interesante, cuando se trata de estudiar el trayecto subterráneo seguido por esa agua, desde su infiltración en la superficie del terreno hasta su salida de nuevo al exterior por el referido manantial. He dicho también que cuando la temperatura del agua que sale por un manantial es casi igual á la temperatura media del lugar, puede asegurarse que el trayecto subterráneo seguido por esa agua es más bien horizontal que vertical, es decir, es más bien superficial que profundo. Pues bien, la temperatura media del agua que sale por los manantiales de la hacienda de Eslava es de 10° C. y la temperatura del agua de los manantiales del río de la Magdalena varía entre 10° y 14° C. Es vista de estos datos es fundado asegurar que el trayecto subterráneo seguido por esas aguas es más bien superficial, y no vertical profundo.

El material arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, que cubre en grandes extensiones á la andesita de hornblenda é hyperstena, de la zona de que me ocupo, es un depósito de mucha importancia para el régimen de los manantiales de esa región. En efecto, siendo ese material bastante poroso permite la infiltración fácil del agua, líquido que se acumula en sus

poros, y de los cuales pasa poco á poco á los espacios vacíos contenidos en las grietas de la andesita mencionada, para volver después al exterior por los manantiales. En los momentos de las abundantes precipitaciones acuosas, ese material poroso se satura de agua, aumenta entonces la presión hidrostática y por consiguiente la velocidad de circulación del agua en el subsuelo, y este líquido pasa en mayor cantidad para los espacios vacíos contenidos en las grietas de la andesita, y sale en mayor cantidad por los manantiales. Así se explica el aumento de gasto de estos orificios de desagüe, poco después de las precipitaciones acuosas cercanas. Más tarde, el nivel del agua va bajando, la presión hidrostática va disminuyendo, es menor entonces la velocidad con la cual el agua circula en su trayecto subterráneo, y por lo tanto va siendo en tiempo de secas cada vez menor el gasto de los manantiales. Algunos de estos se secan durante cierta época del año, lo cual prueba: que es pequeño el receptáculo acuífero subterráneo que desagua por esos manantiales; que representan un volumen relativamente pequeño los espacios vacíos contenidos en las grietas de la andesita; y que es de poco espesor, de poca importancia el revestimiento poroso que cubre á la andesita, en la superficie de terreno donde se infiltran las aguas superficiales. Otros manantiales situados en esta misma roca son permanentes durante todo el año, aunque su gasto es variable, lo cual prueba que el trayecto subterráneo de las aguas es relativamente corto; pero que los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por ellos, son mucho más voluminosos que en el caso anterior, y que es también de mayor importancia el depósito poroso que cubre á la andesita en la superficie de alimentación de los referidos receptáculos. Se ve por lo anterior la importancia tan grande que tiene en el régimen de las aguas subterráneas el depósito poroso que cubre á la andesita de la región en varios lugares; depósito que al permitir la infiltración abundante de las aguas superficiales y al acumular en sus poros á esta agua, constituyen la parte principal de la región de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita, y garantizan el régimen permanente de los manantiales. Cuando por erosión desaparece este depósito poroso y queda la andesita á descubierto, desaparece la parte más importante de la región de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, disminuye considerablemente la cantidad de agua que se filtra y circula por las grietas de la andesita, y desaparecen los manantiales, ó su gasto es muy pequeño tendiendo á ser más bien de régimen temporal que permanente.

Todo lo anterior, pero en un grado mucho más importante, se aplica á los depósitos de cenizas y arenas volcánicas que cubren á la andesita de hornblenda é hyperstena, sobre todo en los alrededores del Ocotil; y digo en grado mucho más importante, porque este material incoherente es muchísimo más poroso que la arcilla arenosa mezclada con tierra vegetal. Como dije antes, las cenizas y arenas son más porosas y también mucho más permeables que la arcilla arenosa mezclada con tierra vegetal; y esa mucha

mayor permeabilidad en el depósito poroso que cubre á la andesita, en la zona de que me ocupo, ocasiona una variante en la circulación ya indicada de las aguas en el interior de ese depósito poroso, variante que es de mucha importancia, como se verá en seguida.

El agua infiltrada en los depósitos de arena que cubren á la andesita en los alrededores del Ocotál, desciende con relativa facilidad por los espacios vacíos que separan á los granos de la arena, y llega á la superficie de contacto entre la andesita y el depósito de arena que la cubre. Desde esta superficie para el interior de la andesita, el descenso del agua es menos fácil, porque no puede verificarse por toda la masa de esta roca, sino únicamente por los espacios vacíos más ó menos capilares contenidos en las zonas agrietadas de la misma roca. Esta circulación localizada, mucho menos activa que la continua que tiene lugar por toda la masa del depósito arenoso, ocasiona que una parte del agua infiltrada no pueda penetrar al interior de la andesita, sino que se detiene, como lo haría sobre un fondo casi impermeable al llegar á la superficie andesítica sobre la cual se apoyan los depósitos arenosos. Una parte del agua infiltrada en estos depósitos pasa á las grietas de la andesita y alimenta á los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en esta roca; y el exceso del agua infiltrada, y que llega hasta la superficie de contacto entre la andesita y la arena se acumula sobre esta superficie, y tiende á salir de nuevo al exterior en las barrancas que cortan á los referidos depósitos de arena. Como se ve, estos depósitos no son únicamente la parte principal de la región de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita, región que garantiza el régimen permanente de los manantiales, sino que dentro de esos depósitos hay también receptáculos acuíferos subterráneos completos, los cuales desaguan, como indicaré en seguida, por manantiales situados en los mismos depósitos arenosos.

Los espacios comprendidos entre los granos de arena constituyen el receptáculo subterráneo por el cual circula el agua dentro de los montículos ó lechos de cenizas y arenas volcánicas; pero como la amplitud de los espacios mencionados varía con la forma y dimensiones de los granos de ceniza ó arena, la circulación subterránea del agua se verifica de preferencia siguiendo los trayectos más amplios, y así se forman varios sistemas venoso-acuíferos situados dentro de los referidos depósitos de material cinerítico. Los sistemas venosos anteriores, están imperfectamente limitados por los tramos del mismo depósito de arena en los cuales es muy fino el grano de esta última. En esos tramos el agua circula también, pero la velocidad de su circulación en ellos es mucho menor que aquella con la cual desciende por los trayectos menos capilares que constituyen á las venas mencionadas, venas que se hallan localizadas en los tramos en que son más gruesos los granos de arena. Según lo anterior, dentro de los montículos y lechos de cenizas y arenas hay dos clases de circulación de agua: una más importante y relativamente fácil, que tiene lugar en conductos irregulares, los cuales

forman sistemas venosos imperfectos; y otra menos importante, mucho menos localizada y mucho más lenta, que se verifica casi por todas partes de los depósitos de ceniza ó arenas. Esta segunda circulación, por ser bastante lenta, es la que garantiza mejor la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos situados en la andesita que está cubierta con los depósitos de arena, porque siendo entonces relativamente pequeña la cantidad de agua que en la unidad de tiempo llega á la superficie de contacto entre la arena y la andesita, la cantidad total de agua acumulada en los poros de esos tramos en que la arena es de grano fino, puede ser suficiente para garantizar durante las secas la alimentación de los referidos receptáculos. En cambio, la circulación relativamente rápida del agua por los sistemas venosos ya indicados, ocasiona que llegue á la superficie de contacto entre la arena y la andesita un volumen de agua mucho mayor que la cantidad de este líquido que en igual tiempo puede penetrar á la andesita del subsuelo, y ese exceso de agua se detiene en la superficie de contacto mencionada, para descender sobre esta superficie y salir de nuevo al exterior por manantiales situados en las partes bajas del afloramiento de esta superficie de contacto, y por manantiales situados en las barrancas que cortan á los referidos depósitos de arena. El exceso de agua que descendiendo por los sistemas venosos anteriores llega hasta la superficie de contacto de la arena con la andesita, puede seguir como trayectos más fáciles para continuar su descenso, las partes deprimidas de esa superficie de contacto; y también los lechos de arena más permeables que llegan hasta esa superficie. Por estas razones dije antes que, el exceso de agua de que me ocupo sale por manantiales situados en las partes bajas del afloramiento de la superficie de contacto, y por manantiales situados en los lechos de arena más permeables que estén cortados por barrancas.

Se ve por lo anterior que existen dentro de los depósitos cineríticos del río de la Magdalena, del Ocotal para Cieneguillas, receptáculos acuíferos completos. En efecto, la superficie de alimentación de estos receptáculos está constituida por la extensión de terreno ocupada por esos depósitos arenosos; la región de alimentación y la región activa está formada por sistemas venosos acuíferos localizados en las partes relativamente más permeables de los mismos depósitos, y en la superficie de contacto entre la arena y la andesita del subsuelo; y los orificios de desagüe de los referidos receptáculos, son los manantiales situados en las barrancas que cortan á los depósitos de arena, ó que descubren las partes bajas de la superficie de contacto que acabo de mencionar.

Teniendo en cuenta lo anterior se comprende que, si por efecto de una erosión activa fueran transportados lejos esos depósitos de arena que en grandes extensiones cubren á la andesita en el río de la Magdalena, desaparecerían los manantiales por los cuales desaguan en la actualidad los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en esos depósitos de material cinerítico; y además, al desaparecer la parte principal de la región de

alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita, disminuiría notablemente el gasto de los manantiales situados en las grietas de esa roca, y el régimen de estos manantiales tendería á ser más bien temporal que permanente, pues se secarían por lo general durante algunos meses en el año. Es decir, que esos depósitos de arena que cubren á la andesita por los alrededores del Ocotal y Cieneguillas; y también, aunque en mucha menor escala, los depósitos de arcilla arenosa mezclada con tierra vegetal que se hallan sobre la andesita, en la mayor parte de los cerros de la Magdalena y Eslava, desempeñan el papel de una esponja, permítaseme la comparación. Esta esponja se llena de agua durante la temporada de lluvias, lo cual le permite alimentar con agua en todo tiempo á las grietas de la andesita que cubre, y el exceso de ese líquido sale al exterior por varios orificios situados en la misma esponja. Esta es, por lo tanto, la que normaliza el régimen de los manantiales y garantiza su gasto durante la temporada de secas. Quitando esta esponja desaparecerían los manantiales situados en ella, y disminuiría notablemente el gasto de los manantiales situados en las grietas de la andesita de hornblenda é hyperstena de la zona de que me ocupo.

Aceptada la existencia de receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el revestimiento arenoso que cubre á la andesita en los alrededores de Cieneguillas y el Ocotal, y teniendo en cuenta los razonamientos ya expuestos en este escrito, se deduce que, en las barrancas que cortan á este depósito arenoso debe haber manantiales, que por estos orificios de desagüe saldrá agua fría con temperatura más ó menos igual á la media local, que el gasto de estos manantiales será mayor que el de los situados en las grietas de la andesita, que las lluvias cercanas ejercerán influencia rápida y notable en el gasto de los referidos manantiales; y por último, que algunos de estos se secarán en cierta época del año, principalmente los que se hallen más lejanos de la superficie de contacto entre la arena y la andesita. Todas estas deducciones están comprobadas por hechos de observación como se verá en seguida.

En todas las barranquillas que con rumbos medios Norte-Sur y Oriente-Poniente cortan al revestimiento arenoso en los alrededores del Ocotal y Cieneguillas, se hallan muchos manantiales entre los que mencionaré como más importantes á los siguientes: los de Coaxoyaque, el Ocotal, los Cuervos, el Arenal, los del Cochinito, los Muñecos, etc. El agua que sale por todos estos manantiales es fría, variando su temperatura entre 10° y 14° C. El gasto de cada uno de estos manantiales es mucho mayor que el de los situados en las grietas de la andesita, como puede verse comparando las láms. VI, fig. 2 y VII, fig. 1 con las VII, fig. 2 y VIII, fig. 1. La lámina VI, fig. 1 es la fotografía de un manantial situado en revestimiento arenoso del cerro Coaxoyaque, al Poniente y arriba del lugar llamado el Campanario. La disposición de los lechos de arena en este lugar puede verse en la lám. IV, fig. 1 que representa el terreno situado á unos diez metros



de distancia del fotografiado en la lám. VI, fig. 2. La lám. VII, fig. 1 representa un manantial situado en el revestimiento arenoso, cerca de Cieneguillitas. Por estos manantiales, así como por los del Ocotál, sale regular cantidad de agua, y en cambio sale muy poca por el manantial del Campanario, situado en las grietas de la andesita y representado por la lámina VII, fig. 2, en la cual y hacia la derecha se ve el hilito de agua que sale de este manantial. De muy poco gasto es también el manantial representado en la lám. VIII, fig. 4, que está situado en las grietas de la andesita en el cerro Zacapatongo. Recorriendo el río de la Magdalena se ve que, la mayor parte del agua que baja por él, sale de los manantiales situados en el revestimiento arenoso de los alrededores de Cieneguillas y el Ocotál, y que son de poco gasto relativamente los manantiales situados en las grietas de la andesita. Además, es muy notable la acción que ejercen sobre el gasto de los manantiales de la región las lluvias caídas en el revestimiento arenoso antes mencionado; y en cierta época del año se secan algunos de los manantiales que están en este revestimiento, pero lejanos de la superficie de contacto entre la arena y la andesita. Entre estos últimos debo citar algunos de los que se hallan por Cieneguillitas, muy arriba del fondo de la barranca por la cual desciende el río de la Magdalena.

Los manantiales que se hallan en las grietas de la andesita son por lo general de gasto muy pequeño, tanto los del río de la Magdalena como los de la hacienda de Eslava. El volumen de agua que sale por cada uno de ellos es en promedio de cinco á diez litros por segundo. Además, casi todos esos manantiales están á la altura en que termina el revestimiento de material arcilloso que cubre á la andesita en varias partes, ó se hallan en ciénagas situadas en este mismo revestimiento y á diferentes alturas. Esta situación de los manantiales se explica fácilmente como se verá en seguida.

Por las razones ya expuestas, el agua infiltrada que circula en la parte superior de los tramos agrietados de la andesita, tiende á salir de nuevo al exterior siguiendo un trayecto subterráneo relativamente corto, y más bien horizontal que vertical profundo. Al llegar esta agua al extremo inferior del trayecto subterráneo que sigue para volver á salir al exterior, puede encontrarse con que en ese lugar la andesita está cubierta por el revestimiento arcillo-arenoso tantas veces mencionado. Entonces dos casos pueden presentarse: ó este revestimiento es suficientemente permeable en ese lugar, ó es casi impermeable por estar constituido por arcilla solamente. En el primer caso, sale el agua de las grietas de la andesita y pasa al depósito arcillo-arenoso, por el cual continúa su circulación subterránea, formando desde luego una ciénaga en la zona de contacto del depósito arcilloso con la parte fracturada de la andesita por donde sale el agua infiltrada. Como ejemplos de este caso puedo citar, entre otros, algunos de los manantiales del cerro Regaderas, los más orientales, y el manantial que está cerca del segundo dinamo en el río de la Magdalena. En el segundo

caso, cuando el revestimiento arcilloso es casi impermeable, ó su permeabilidad no es suficiente para permitir que salga de la andesita toda el agua que en la unidad de tiempo llega por las grietas hasta el contacto de la andesita con el revestimiento arcilloso, entonces, el agua se detiene total ó parcialmente en ese contacto; y este obstáculo ó esta resistencia, hace que el agua suba de nivel en el interior de la zona agrietada de la andesita, y que busque su salida al exterior por un lugar situado á mayor altura. Este movimiento ascendente continuará por los tramos agrietados de la andesita, hasta que el agua encuentre un trayecto que le permita salir al exterior. Este último estará cuando menos á la altura del límite superior del revestimiento arcilloso, y por esto es que muchos de los manantiales de la región están casi á la altura en que termina el revestimiento arcilloso mencionado. El agua que sale á esta altura va deslavando el revestimiento arcilloso; y este trabajo de erosión ocasiona que el agua pueda salir por orificios situados más abajo, es decir, que después de cierto tiempo los manantiales se hallan á menor altura. Como ejemplo de todo lo anterior puedo citar á uno de los manantiales del cerro las Regaderas, el de gasto mayor. En efecto, este manantial, que estaba á la altura en que termina en ese lugar el revestimiento arcilloso de la andesita, fué bajando lentamente, es decir, que el agua brotaba por orificios situados cada vez á menor altura en la zona agrietada de la andesita. Después, en el año de 1896 tracé un socavón situado varios metros abajo del lugar en que se hallaba ese manantial, y con este socavón se alcanzó el trayecto subterráneo ascendente que seguía el agua por el tramo agrietado de la andesita en ese lugar; y desde entonces, el agua brota á la altura del piso del socavón, y sale por éste al exterior una cantidad algo mayor que el volumen que antes salía por el referido manantial.

Según lo que dije antes, las ciénagas mencionadas pueden ser, ó el principio de otra circulación subterránea importante de las aguas, ó simplemente una zona de retención temporal de las aguas que salen de las grietas de la andesita para penetrar en el revestimiento arcilloso que cubre á esta roca. Cuando pasa de la andesita para este revestimiento regular cantidad de agua durante todo el año, esta agua desciende por el interior del depósito arcilloso-arenoso más ó menos permeable, y penetra por otros tramos agrietados de la andesita del subsuelo, tendiendo á salir por manantiales situados en lugares más bajos. En este caso, la ciénaga puede considerarse como el principio del nuevo trayecto subterráneo que sigue el agua, después de haber salido de las grietas de la andesita por orificios subterráneos situados en el contacto de esta roca con el material arcilloso que la cubre. Entonces, si se abren tajos en la ciénaga, el agua saldrá al exterior en su mayor parte, como sucedió al abrir estos tajos en dos de las ciénagas del cerro las Regaderas en la hacienda de Eslava. En cambio, cuando es muy pequeña la cantidad de agua que pasa subterráneamente de las grietas de la andesita para el revestimiento arcillo-arenoso, y que ésta agua sólo pasa

en tiempo de lluvias, entonces, la ciénaga es solamente una zona de retención temporal de las aguas, zona en la que se acumula agua durante las lluvias y que después va desapareciendo de ese lugar por infiltración y por evaporación. Si en una de estas ciénagas se abren tajos, sale el agua allí acumulada; pero después el lugar queda seco y la ciénaga desaparece. Esto sucedió en las pequeñas ciénagas que existían en la barranca de Atongo, abajo de las Peñas de Texcalco, perteneciente á la hacienda de Eslava.

Una parte del agua que sale al exterior por los manantiales ya mencionados de la zona de que me ocupo, se infiltra de nuevo como se verá en seguida.

El agua que brota por los manantiales situados en las vertientes Norte del cerro las Regaderas, baja por Monte Alegre para la meseta de la Campana, y de aquí continúa por la corriente basáltica del Xitle (véase lámina XIII) para la planicie el Gavillero, á donde llega una cantidad insignificante, pues la mayor parte del agua se infiltra al pasar por los basaltos mencionados. Con objeto de aumentar la cantidad de agua que llega al Gavillero se hizo una obra para que las aguas siguieran otro trayecto superficial, sobre todo en tiempo de secas. Por este nuevo trayecto, el agua no pasaba ya sobre el basalto, pero sí en muchos lugares descendía sobre el material arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal que se halla en casi toda esa zona, principalmente en las pequeñas planicies escalonadas que hay entre Eslava y Monte Alegre. En este depósito arcilloso el agua se infiltra también, como pude comprobarlo con multitud de aforos, pero la infiltración es menor que en el basalto esponjoso de las cercanías; y por lo tanto, siguiendo las aguas este nuevo trayecto se consiguió llegara en tiempo de secas al Gavillero un volumen de agua mayor relativamente comparado con el que llegaba antes, pero siempre muy pequeño respecto al que sale por los manantiales del cerro Las Regaderas.

El agua que brota por los manantiales situados en las vertientes Sur del cerro Las Regaderas, y por los manantiales de Viborillas, baja á la meseta de este último nombre en donde se infiltra la mayor parte.

El agua que brota por el manantial de la Escondida baja para la meseta de este nombre, y después para la de Rancho Viejo en donde se infiltra de nuevo la mayor parte.

El agua del manantial La Leona baja para las mesetas de la Máquina y Rancho Viejo, en las cuales se infiltra.

En el río de la Magdalena la mayor parte del agua que sale por los manantiales ha sido aprovechada como fuerza motriz; y por lo tanto, esa agua no desciende ya por el río, sino que baja desde el Ocotál hasta cerca de La Cañada, por canales abiertos en las faldas de los cerros. En este trayecto se infiltra una parte del agua, en los tramos en que los canales están abiertos en los depósitos permeables ya mencionados, como sucede, por ejemplo, en el canal abierto para desviar las aguas del manantial de Coaxoyaque, canal que en parte puede verse en la lámina VI, fig. 2.

La parte Norte-Oriente de la zona de que me ocupo, ó sea el terreno que baja de la hacienda de La Cañada y pueblo San Bartolo, por San Jerónimo y Tepelpa, para Tizapán y San Angel (véase lám. XIII), está constituido, como he dicho, por tobas detríticas cuaternarias que se apoyan sobre brechas volcánicas terciarias, las cuales á su vez están sobre la andesita de hornblenda é hyperstena ya indicada. Toda esta zona es de poca importancia relativa como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos, porque la toba detrítica de grano fino que se halla en la superficie del terreno en esa región tiene un coeficiente de infiltración muy pequeño. En efecto, siendo capilares ó subcapilares los poros ó espacios vacíos contenidos en esa roca, la velocidad de infiltración del agua es pequeña; además, todo ese terreno tiene una inclinación que varía entre dos y tres por ciento, y está totalmente desprovisto de vegetación, todo lo cual ocasiona que se verifique lo siguiente. Cuando la lluvia es lenta y cae durante poco tiempo, penetra en esa toba muy pequeña cantidad de agua, y ésta no llega á pasar de la zona superficial influenciada por la evaporación; por lo tanto al terminar la lluvia comienza á evaporarse con rapidez el agua infiltrada, pues no hay arboleda que disminuya la velocidad de esta evaporación, velocidad que siendo mayor que la de infiltración del agua en esa roca, hace que toda el agua infiltrada vuelva á la atmósfera y no alimente receptáculos acuíferos subterráneos. Cuando la lluvia es muy abundante y dura poco tiempo, llega á la superficie de la toba detrítica una cantidad de agua mucho mayor de la que puede infiltrarse en esa roca en igual tiempo, y como el terreno está muy inclinado el exceso de agua precipitada descendiendo superficialmente por los arroyos, es decir, que en estas condiciones es también pequeña la cantidad de agua que se infiltra, la cual no pasa de la zona influenciada por la evaporación, y vuelve á la atmósfera como en el caso anterior. Cuando la lluvia es lenta y cae durante mucho tiempo, se infiltra en la toba mayor cantidad de agua que en los dos casos anteriores; pero ni en estas condiciones la infiltración es muy considerable, porque siendo la velocidad de infiltración en la toba mucho menor que la velocidad con la cual descende el agua por la superficie de ese terreno, la mayor parte del agua precipitada descende por los arroyos, y sólo una pequeña cantidad se infiltra y pasa de la zona superficial de evaporación para alimentar receptáculos acuíferos subterráneos. Se comprende por lo anterior, que es muy pequeña la cantidad de agua que se infiltra en esa toba detrítica, comparada con el volumen total del agua que anualmente descende por la superficie de terreno ocupado por el afloramiento de esa roca, es decir, que es muy pequeño el coeficiente de infiltración de la mencionada toba detrítica en las condiciones mencionadas.

Tanto el agua que directamente se infiltra en las tobas anteriores, como el agua que en el subsuelo pase de las grietas de la andesita para las mismas tobas, descende subterráneamente por las lomas antes mencionadas y contribuye á la alimentación de los receptáculos acuíferos subterrá-

neos situados en el subsuelo de la parte Sur de la planicie de México, y de los cuales me ocuparé más adelante.

Antes de concluir esta parte de mi estudio, relativo á la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, tengo que indicar algunas cantidades que sirvan para formarse alguna idea acerca del volumen de agua que circula en el subsuelo de esa zona. Debo advertir ante todo, que no hay datos pluviométricos completos de esa región, ni dato alguno permeométrico local; y por lo tanto, no existiendo estos datos de observación, ni tampoco un plano exacto que permitiera conocer la superficie de terreno ocupada por cada uno de los materiales permeables ya mencionados, las cantidades que indicaré en seguida deberán considerarse solamente como aproximaciones rudas, como tentativas hechas para dar alguna idea acerca del volumen de agua subterránea en esa región.

Dos coeficientes de infiltración he indicado ya para los materiales que afloran en la zona de que me ocupo, coeficientes que creo aplicables en las condiciones en que esos materiales se encuentran en la zona mencionada. En efecto, siendo por lo general bastante fuerte la pendiente del terreno en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de esa región, y estando ésta desprovista en algunas partes de frondosa arboleda, puede asegurarse lo siguiente. Las lloviznas que caen sobre el material cinerítico y sobre el arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, no proporcionan agua á la circulación subterránea en esa zona, sino que toda el agua caída lentamente durante poco tiempo vuelve á la atmósfera por evaporación. Las lluvias abundantes pero de poca duración no permiten que se infiltre bastante agua en los tramos arcillo-arenosos, y poca es relativamente la que se infiltra en el material cinerítico, pues en esas condiciones la mayor parte del agua desciende superficialmente por los arroyos. Las lluvias lentas pero que caen durante mucho tiempo son las que proporcionan el agua que alimenta á los receptáculos acuíferos subterráneos de esa región. Teniendo en cuenta todo lo anterior y los resultados de algunos experimentos, creo aproximados los números que indiqué ya, es decir: que del volumen de agua que durante el año recibe la superficie ocupada por las arenas que se hallan en los alrededores del Ocotál, sólo se infiltra el cincuenta por ciento; y que de la cantidad de agua total, recibida por la superficie que ocupa el material arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, que cubre á la andesita en casi toda la zona de que me ocupo, se infiltra el veinte por ciento solamente.

La superficie de terreno ocupada por el material arenoso de los alrededores del Ocotál y Cieneguillas, es aproximadamente, 16 kilómetros cuadrados, según los croquis topográficos que mencioné ya en este escrito; y la superficie de terreno ocupada por el material arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, según los mismos croquis, es 64 kilómetros cuadrados. Aceptando estos datos, así como los coeficientes de infiltración anteriores, y teniendo en cuenta que el promedio de la precipitación anual en esa zona es

de 70 centímetros, se obtienen: 12 millones de metros cúbicos de agua infiltrados anualmente en esa superficie de alimentación. Es decir, que los receptáculos acuíferos subterráneos de esta zona pueden proporcionar en promedio aproximado: 380 litros por segundo. La mayor parte de esta cantidad está saliendo al exterior como promedio por todos los manantiales del río de la Magdalena y de la hacienda de Eslava.

Como la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que acabo de mencionar se halla en los cerros ya indicados, que forman parte de la zona de unión entre las sierras de las Cruces y del Ajusco, y como en esa superficie no existen poblaciones, ni cementerios, ni pozos absorbentes, ni causa alguna que pudiera contaminar á las aguas antes de infiltrarse en el subsuelo, puede asegurarse que: entretanto no varíen estas condiciones en la referida superficie de alimentación, el agua al salir por los manantiales del río de la Magdalena y por los de la hacienda de Eslava, no está contaminada, y por lo mismo no es nociva á la salud.

Más adelante indicaré la manera de aumentar el caudal de agua subterránea en esta zona, y las obras de captación que pueden recomendarse.

#### ZONA LA MAGDALENA—TLALPAN

En la zona que he llamado La Magdalena—Tlalpan, el subsuelo está constituido por la andesita de hornblenda, roca que aflora tanto al Este como al Oeste, en los contrafuertes ya mencionados que limitan á la referida zona. Sobre la andesita se hallan, en la parte baja de la serranía al Sur de Tlalpan, las brechas terciarias cubiertas por tobas detríticas cuaternarias. En la parte alta de esta zona, sobre la andesita se apoyan directamente los basaltos cuaternarios y recientes, los cuales escurrieron en la parte baja sobre las brechas y las tobas antes mencionadas. Entre los pueblos de San Andrés, Xicalco, La Magdalena y Ajusco, hay un depósito bastante grueso de arenas volcánicas (lám. III, figs. 1 y 2); y al Sur de los afloramientos andesíticos de los cerros Magdalena y Tehuehue, en la planicie del Ajusco, hay otro gran depósito de material cinerítico cubierto en parte por tobas arenosas. Del pueblo del Ajusco para el Sur, sobre la andesita de hornblenda de los cerros del Ajusco y Mezontepec, se encuentran los basaltos de los cerros Pelado y Oyameyo, basaltos que en parte están cubiertos por tobas arenosas.

Como se ve por lo anterior, en varios lugares de esta zona aflora la andesita de hornblenda, roca que como dije ya, constituye el fondo casi impermeable de esta zona, y á los dos contrafuertes también casi impermeables que limitan en el subsuelo á la misma zona por el Este y por el Oeste. Es decir, que en las antiguas vertientes del macizo andesítico del Ajusco existía una cortadura que bajaba de Sur á Norte, entre los cerros Magdalena y Tehuehue para Tlalpan, cortadura por la cual escurrieron después

los basaltos cambiando la fisonomía del terreno. Dentro de este edificio basáltico apoyado sobre la andesita de hornblenda casi impermeable, se hallan los receptáculos acuíferos subterráneos de los cuales me ocupó en seguida.

La superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la zona La Magdalena-Tlalpan, creo que pueden limitarse aproximadamente como sigue: al Sur, por los afloramientos andesíticos en los cerros del Ajusco y Mezontepec para el cerro Pelado; al Este, del cerro Pelado para los cerros andesíticos Tehuehue y Xochitepec hasta Tepepan; al Norte, por el extremo de la corriente basáltica; y al Poniente, por los afloramientos andesíticos de los cerros Zacatepec, Zacayuca y El Conejo en las faldas orientales del Xitle, hasta los cerros del Ajusco. El terreno comprendido dentro de los límites anteriores desciende escalonado de Sur á Norte, siendo el más interesante de estos escalones el que se halla en los alrededores del Ajusco. De los cerros Mezontepec y Pelado, el terreno baja para la planicie del Ajusco, la cual está limitada al Norte por los afloramientos andesíticos en los cerros Magdalena y Tehuehue, y por los basaltos del cerro Olihcan; pero entre los cerros Tehuehue y Olihcan, y al Poniente del cerro Magdalena, continúa el descenso del terreno para los pueblos Xicalco y la Magdalena, y de estos últimos para los llamados San Andrés, San Pedro y Tlalpan. Por la parte occidental de esta zona el descenso del terreno es más uniforme, del Ajusco por las faldas del Xitle para Peña Pobre y Tlalpan.

Conocidas ya las rocas que afloran en la superficie de alimentación antes limitada, paso á indicar los coeficientes aproximados de infiltración del agua en cada una de esas rocas.

La andesita de hornblenda del Ajusco, por las razones ya mencionadas puede considerarse como una roca casi impermeable, la cual constituye á la muralla divisoria que separa á las aguas subterráneas que hacia el Norte descienden para la cuenca de México, de las que al Sur bajan para Cuernavaca y Jiutepec. Por lo tanto, en los afloramientos de esta roca puede decirse que es casi nula la infiltración del agua.

El afloramiento del basalto en la zona que he llamado La Magdalena-Tlalpan, ocupa una extensión aproximada de 50 kilómetros cuadrados, según los planos topográficos que se hallan en la lám. XIII; pero el basalto no es uniformemente permeable en todo el afloramiento. En efecto, como he dicho ya, en unos lugares este basalto es macizo, muy compacto, y por lo mismo casi impermeable; en otros lugares es esponjoso muy poroso; y en otros, por último, está agrietado en muchas direcciones, lo cual le da un aspecto fragmentario. En los dos últimos casos es bastante considerable la permeabilidad localizada del referido basalto, el agua se infiltra en él por los poros, grietas y cavidades superficiales que contiene, y circula en el interior de esa roca por conductos irregulares y más ó menos supercapilares. La amplitud de estos conductos subterráneos permite que el agua descien-

da con relativa facilidad; y por lo mismo, la infiltración en la superficie del terreno puede ser considerable, no obstante que la permeabilidad de esa roca no es continua sino localizada. Teniendo en cuenta lo anterior se comprende sin dificultad, que tanto las precipitaciones acuosas abundantes y de poca duración, como las menos voluminosas y más duraderas, proporcionan agua á los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el basalto, agua que en partes desciende por la superficie de la roca, y luego se infiltra al llegar á las partes más porosas ó agrietadas del referido basalto. Sin embargo, recorriendo con detenimiento la superficie de alimentación de la cual me estoy ocupando, se concluye que, lo anterior no se verifica en toda la superficie ocupada por el afloramiento basáltico, sino cuando más en una tercera parte de este afloramiento, pues en todo el resto el basalto es muy compacto, no está agrietado y por lo mismo es casi impermeable. Según esto, de la superficie total de terreno ocupada por las corrientes basálticas en la zona La Magdalena-Tlalpan, sólo unos dieciséis kilómetros cuadrados aproximadamente pueden considerarse como superficie de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos.

En las partes en que el basalto tiene una estructura esponjosa muy porosa, ó se halla surcado por multitud de grietas debidas en su mayor parte á esfuerzos de tensión durante el enfriamiento de la roca, se infiltra aproximadamente en la zona de que me ocupo, el 60 por ciento del volumen de agua precipitada anualmente en los dieciséis kilómetros cuadrados á que hice referencia en el párrafo anterior.

Sobre el basalto, y en una extensión aproximada de quince kilómetros cuadrados, se apoya en la zona de que me ocupo la toba arenosa ya mencionada en párrafos anteriores. La circulación del agua en el interior de esta toba es más activa que en el interior de las tobas detríticas, como dije antes; pero no es tan rápida que permita el aprovechamiento para alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos, del agua proporcionada por precipitaciones lentas de poca duración, ni por precipitaciones acuosas muy abundantes, pero también de corta duración. En el primer caso, el agua no se infiltra más abajo de la zona influenciada por la evaporación, y toda esa agua vuelve á la atmósfera; en el segundo caso, la mayor parte del agua desciende en la superficie muy inclinada del terreno, y del agua infiltrada vuelve á la atmósfera toda la cantidad que no pasó de la zona influenciada por la evaporación. Según esto, en la toba arenosa que se apoya sobre las vertientes basálticas muy inclinadas del Ajusco, la infiltración puede decirse que no es mayor de un 25 por ciento del volumen de agua, que durante el año recibe la superficie de terreno ocupada por la referida toba arenosa.

En la planicie del Ajusco se encuentra un depósito grueso de arena volcánica cubierto en algunas partes por toba arenosa. La poca pendiente del terreno en este lugar permite que la infiltración del agua sea allí relativamente mayor que en terrenos arenosos muy inclinados, porque en el primer



caso la velocidad con la cual desciende el agua superficial es mucho menor que en el segundo caso. Por esto, en la planicie del Ajusco se aprovecha en la alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos no solamente el agua de las precipitaciones lentas y de mucha duración, sino también la de lluvias muy copiosas aun cuando sean poco duraderas. Estas últimas no se aprovechan en la alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos cuando es mucha la pendiente del terreno arenoso, como sucede, por ejemplo, entre los pueblos de la Magdalena y San Andrés. Por lo tanto, el coeficiente de infiltración de los depósitos arenosos que en este último caso es 0.50 aproximadamente, como dije en otro lugar, puede estimarse en 0.70 cuando los mismos depósitos se hallan en esa región en terrenos casi horizontales. La superficie ocupada por el depósito arenoso entre San Andrés, la Magdalena y Ajusco es de cuatro kilómetros cuadrados aproximadamente; y la porción de la planicie del Ajusco, que por las razones que indicaré después, creo que forma parte de la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la zona que he llamado La Magdalena-Tlalpan, ocupa una extensión aproximada de seis kilómetros cuadrados.

La altura total de lluvia caída en la sierra del Ajusco ha sido fijada como promedio en 70 centímetros anualmente.<sup>1</sup> Este dato me parece muy aceptable, porque creo que en esas serranías llueve mucho más que en la ciudad de México, y aquí la altura anual como promedio en veinte años, de 1877 á 1896, es de 578 milímetros, 6 diezmilímetros,<sup>2</sup> altura anual que varió en los veinte años indicados entre 33 y 89 centímetros.

Aceptando el dato anterior referente á la altura total de lluvia durante el año, y teniendo en cuenta los coeficientes de infiltración de cada una de las rocas que he mencionado en los párrafos anteriores, y el número de kilómetros cuadrados que ocupa el afloramiento de cada una de esas rocas en la superficie de alimentación ya limitada, se puede conocer aproximadamente la cantidad de agua que anualmente circula en los receptáculos acuíferos subterráneos que se hallan en esta zona. Esta cantidad de agua que paso á indicar debe considerarse como una primera aproximación, que permite solamente formarse alguna idea acerca de la importancia de esa circulación subterránea, pues la falta absoluta de mejores datos permeométricos locales, impide llegar á resultados mucho más cercanos de la verdad.

Como dije antes, en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de la zona La Magdalena-Tlalpan, el basalto con coeficiente de infiltración igual á 0.60, aflora en 16 kilómetros cuadrados de extensión; las tobas arenosas, con coeficiente 0.25, afloran en 15 kilómetros cuadrados; los depósitos arenosos de la falda Norte del cerro Magda-

1 M. Marroquín, &c. L. c. pág. 172.

2 Bol. del Observatorio Meteorológico Central de México. Año 1896, pág. 170.

lena, con coeficiente 0.50, ocupan cuatro kilómetros cuadrados; y por último, los depósitos arenosos de la planicie del Ajusco, con coeficiente de infiltración igual á 0.70, ocupan una superficie aproximada de seis kilómetros cuadrados. Con estos datos, y sabiendo que la altura total de lluvia en el año es en promedio 70 centímetros, se obtienen 13.685,000 metros cúbicos de agua, como infiltración anual que alimenta los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la zona La Magdalena-Tlalpan. Es decir, que el desagüe de estos receptáculos puede dar en promedio 434 litros por segundo. Una gran parte de este volumen de agua sale por los manantiales de Peña Pobre (láms. VIII, fig. 2 á X, fig. 1), por los del lugar llamado Las Fuentes de Tlalpan (láms. X, fig. 2 y XI, fig. 1), por los del Santo Niño (láms. XI, fig. 2 y XII, fig. 1), los del Coxcomate, etc. (lámina XIII); y otra parte de esa agua contribuye á la alimentación de las capas artesianas que hay en el subsuelo de la planicie de México, y de las cuales sube el agua por pozos como los perforados en los alrededores de la Taxqueña (lámina XII, fig. 2). El volumen total de agua infiltrada anualmente en la superficie de alimentación de que me ocupó, varía con la cantidad de lluvia caída durante el año. El promedio de la altura total de agua precipitada por año es 70 centímetros, como dije antes; pero esta altura varía mucho de un año á otro, y de igual manera varía también el gasto total de los manantiales que acabo de mencionar, gasto que es mayor en los años muy lluviosos, y que disminuye notablemente cuando son escasas y poco voluminosas las precipitaciones en la serranía del Ajusco, sobre todo en la superficie de alimentación ya limitada para la zona que he llamado La Magdalena-Tlalpan.

Las aguas infiltradas en el basalto del Ajusco, ya sea directamente, en las partes porosas y agrietadas del afloramiento de esta roca, ó bien por intermedio de los depósitos arenosos ó tobosos que cubren en partes á la misma roca (véase lám. XIII), circula en el interior del basalto por conductos irregulares y más ó menos amplios. Estos conductos se hallan en las zonas agrietadas del basalto, y también dentro de las corrientes basálticas en los lugares por donde se verificó el escurrimiento continuo de la lava fluída, lugares en los cuales han quedado cavidades supercapilares, muchas veces de notable amplitud, como dije en otro lugar. Estos conductos y cavidades no están distribuídos de una manera uniforme en toda la masa basáltica, sino que dentro del edificio constituído por los basaltos se hallan muy diseminadas las cavidades anteriores, trayectos subterráneos éstos por los cuales circula el agua, y que son tan irregulares como difícil es localizarlos desde la superficie del terreno. Por estos conductos irregulares el agua puede descender con relativa rapidez, y aunque la velocidad varía de un lugar á otro, principalmente con la amplitud é inclinación de los referidos conductos, puede tenerse una idea de esa velocidad conociendo los siguientes datos.

En el año de 1906 fui comisionado por el señor Gobernador del Estado

de Morelos, para resolver si la laguna de Hueyapan está unida por conductos subterráneos con los manantiales de los Cuauchiles y de las Fuentes de San Gaspar. Tanto la una como los otros se encuentran en corrientes basálticas al Sur de la sierra del Ajusco, y á poca distancia al Sureste de la ciudad de Cuernavaca. Para resolver la cuestión anterior y demostrar experimentalmente que existe conexión subterránea entre la laguna y los manantiales antes mencionados, hice uso de la fluoresceína. De esta manera no sólo demostré á los interesados la existencia de la conexión subterránea anterior, sino que pude determinar con exactitud la velocidad de la circulación del agua por los conductos subterráneos situados dentro de las corrientes basálticas de esa localidad. Esta velocidad fué en promedio de 5.75 metros por minuto, habiendo variado entre 5.55 y 5.95 metros por minuto.<sup>1</sup>

La velocidad de descenso del agua por los poros más ó menos capilares de las tobas arenosas en la serranía del Ajusco, y por los espacios vacíos existentes entre los granos de arena más ó menos fina que se halla en depósitos gruesos tanto en la planicie del Ajusco como en las faldas del cerro Magdalena, es mucho más pequeña que la indicada en el párrafo precedente. Esta menor velocidad de infiltración del agua en las tobas y arenas regulariza en parte la circulación del agua en el interior de los materiales mencionados, y tiende á garantizar el régimen permanente de los manantiales. En efecto, el agua que se infiltra en la superficie de terreno ocupada por las tobas y depósitos arenosos, desciende con más ó menos lentitud por los poros de estos materiales, hasta llegar al basalto sobre el cual se apoyan las tobas y las arenas. En seguida, el agua circula por la superficie de contacto entre éstas últimas y el basalto, hasta encontrar en esta roca grietas ó cavidades por las cuales desciende con mayor velocidad, como dije antes. Es decir, que si no existiera sobre el basalto el depósito arenoso ó toboso á que me refiero, el agua infiltrada directamente en las grietas ó cavidades del basalto descendería con mucha velocidad, sería poco relativamente el tiempo que el agua emplearía desde su infiltración en el terreno hasta su salida al exterior por los manantiales; y por lo mismo, el gasto de estos últimos sería muy variable y su régimen tendería á ser más bien temporal que permanente. En cambio, la lentitud con la cual desciende el agua por los depósitos arenosos y tobosos mencionados, garantiza una alimentación más uniforme á los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos dentro de las corrientes basálticas. Según esto, la desaparición de esos depósitos cineríticos que sirven en parte de revestimiento á las corrientes basálticas en la zona de que me ocupo, no solamente ocasionaría una disminución notable en la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, sino que esta alimentación sería muy irregular, nula

1 Juan D. Villarelo. Hidrología subterránea de las cercanías de Jiutepec (E. de Morelos). *Memorias de la Sociedad Alzate*. Tomo XXIV, págs. 169 y 170.

en tiempo de secas y durante estos meses sería muy pequeña la cantidad de agua que saldría por los manantiales de los alrededores de Tlalpan.

El agua que se infiltra en las faldas orientales de los cerros de Mezontepec, Pelado y del Oyameyo, desciende por las tobas y basaltos, cuando más, hasta llegar á las antiguas vertientes andesíticas de la serranía del Ajusco; y sobre este fondo inclinado casi impermeable baja para el subsuelo de la planicie del Ajusco, en donde se reune con el agua directamente infiltrada en esta planicie. Continuando el agua su descenso subterráneo hacia el Norte, encuentra en el límite de la planicie anterior, un obstáculo formado por los cerros andesíticos casi impermeables de la Magdalena y Tehuehue, y por el cerro basáltico Olihecan situado entre los dos anteriores. Ese cerro basáltico ocasionó el cambio de fisonomía del terreno en aquel lugar, pues la cortadura que antes existía entre los cerros Magdalena y Tehuehue desapareció al ser rellenada por los basaltos que escurrieron hacia el Norte. Cerrada la cortadura anterior quedó hacia el Sur una depresión que se llenó después con materiales cineríticos, formándose entonces la planicie del Ajusco. Como se ve, el borde de esta planicie hacia el Norte está constituido por dos cerros andesíticos casi impermeables, rodeados y separados entre sí por basaltos que descienden en corrientes hacia el Norte, apoyados sobre la andesita de las antiguas vertientes de esa serranía. Estos basaltos que separan á los cerros Magdalena y Tehuehue no son impermeables, sino que por el contrario están agrietados, y permiten por lo mismo que el agua infiltrada directamente en la planicie del Ajusco, ó la que llega al subsuelo de esta planicie bajando subterráneamente por las faldas orientales de los cerros Mezontepec, Pelado y del Oyameyo, continúe descendiendo hacia el Norte por los conductos irregulares contenidos en las corrientes de basalto, ó por las cercanías del contacto entre esta roca y la andesita que constituye su apoyo. Lo anterior sirve de fundamento á la opinión que expresé ya, diciendo que: una parte de la planicie del Ajusco debe comprenderse dentro de la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la zona La Magdalena-Tlalpan. En efecto, no siendo impermeable el borde que limita por el Norte á la planicie del Ajusco, el agua contenida en el subsuelo de esta misma planicie no es una agua estancada, sino que puede descender por el interior de los basaltos hacia el Norte, para San Andrés y Tlalpan, y también hacia el Norte-Oriente, por los cerros de Topilejo para Xochimilco; y por lo tanto, la parte de la planicie del Ajusco situada al Sur-Poniente del cerro Tehuehue, puede considerarse comprendida en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, que en parte desaguan por los manantiales de los alrededores de Tlalpan.

El depósito arenoso de la planicie del Ajusco sirve de regulador á la alimentación de las grietas y cavidades del basalto del subsuelo, y por lo mismo garantiza el régimen permanente de los manantiales de los alrededores de Tlalpan. En efecto, el agua infiltrada en esta planicie se reune

en el subsuelo con la que desciende subterráneamente en las faldas de los cerros de Mezontepec, Pelado y Oyameyo, y no puede salir al exterior sino al Norte ó Norte-Oriente, que son los rumbos hacia los cuales desciende el terreno. Al continuar su descenso subterráneo con estas direcciones el agua encuentra al basalto en el cerro Olihcan por el Norte, y en los de Topilejo por el Norte-Oriente, y como el basalto no es una roca de permeabilidad continua sino localizada en las grietas ó cavidades que contiene, el agua que pasa en la unidad de tiempo del depósito arenoso para el basalto es solamente la cantidad que en igual tiempo puede circular descendiendo por las grietas ó cavidades irregulares del basalto. En tiempo de lluvias se infiltra en el depósito arenoso de la planicie del Ajusco, mayor cantidad de agua de la que puede descender por los trayectos subterráneos irregulares contenidos en el basalto del subsuelo, y como ese exceso de agua no puede salir al exterior sin pasar por los referidos basaltos, se detiene, se acumula en las cercanías del contacto entre la arena y el basalto. Esa agua allí detenida, no pudiendo volver á la atmósfera por estar ya muy abajo de la zona en la cual puede evaporarse, sirve para regularizar en tiempo de secas la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el basalto, y para garantizar el régimen permanente de los orificios de desagüe de estos receptáculos, ó sea de los manantiales antes mencionados. Según esto, todo lo que tienda á disminuir la evaporación en la planicie del Ajusco, y á aumentar el tiempo que permanecen las aguas corrientes superficiales en la misma planicie, mejorará la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, y aumentará el gasto de los manantiales en la zona de que me ocupo.

De acuerdo con todo lo anterior puede decirse que: los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la zona de La Magdalena-Tlalpan, están constituídos por los poros ó espacios vacíos contenidos en las arenas y tobas arenosas, y por las grietas y cavidades que existen en los basaltos de la región. El agua circula en los depósitos de arena y toba arenosa, formando sistemas venosos acuíferos como los descritos ya en otra parte de este escrito, y pasa en seguida á los basaltos en los cuales circula por trayectos muy irregulares, grietas, venas y grandes cavidades contenidas todas en las corrientes basálticas de la región.

El agua continúa su movimiento subterráneo descendente por las grietas y cavidades del basalto en la zona de que me ocupo, y una parte de esta agua sale de nuevo al exterior por manantiales situados en el mismo basalto, en el borde ó extremidad de la corriente de esta roca, como sucede en Peña Pobre (véanse láms. VIII, fig. 2 á X, fig. 1). Otra parte del agua pasa de las grietas del basalto á las brechas y tobas detríticas que le sirven de apoyo en la parte baja de la serranía, como dije antes, y sale al exterior por manantiales situados en las tobas detríticas como sucede en las Fuentes de Tlalpan (láms. X, fig. 2 y XI, fig. 1), y en el Santo Niño (láms. XI, fig. 2 y XII, fig. 1). Por último, otra parte del agua en su circulación subterránea

pasa de las grietas ó cavidades del basalto para las brechas y tobas detríticas anteriores, y de éstas para los depósitos permeables que se hallan en el relleno de la cuenca, contribuyendo así á la alimentación de las capas acuíferas que existen en el subsuelo de la planicie de México, y de las cuales me ocuparé más adelante.

Al pasar las aguas subterráneas del basalto para las brechas y tobas detríticas, la velocidad de circulación disminuye notablemente, pues como dije en otro lugar, la permeabilidad continua de las brechas y tobas es mucho menor que la permeabilidad localizada del basalto de esta zona. Esa disminución de velocidad impide que en la unidad de tiempo pase á las brechas y tobas mencionadas toda el agua, que en igual período de tiempo, llega subterráneamente al contacto de los basaltos con las brechas y tobas subyacentes; y por lo tanto, ese exceso de agua se acumula en las grietas y cavidades del basalto. Esta agua, que llena en parte á los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el basalto, sirve de reserva para regularizar la circulación subterránea en las tobas, y para evitar durante el año los cambios muy notables en el gasto de los manantiales situados en las mismas tobas.

La circulación del agua en el interior de las brechas y tobas no es igualmente activa en toda la masa de estas rocas, no obstante que su permeabilidad es continua, sino que el agua circula de preferencia y con mayor velocidad por determinados trayectos irregulares, localizados en los tramos de roca en donde los poros son más amplios, ó existen algunas grietas. Así, dentro de las brechas y tobas el agua circula por sistemas venosos imperfectos, separados unos de otros y diseminados por distintas partes de las rocas mencionadas.

Como comprobación de las ideas expuestas en los párrafos anteriores, puedo citar los siguientes hechos de observación. Los manantiales de Peña Pobre, que se hallan en el basalto (véanse láms. VIII, fig. 2 á X, fig. 1), son de gasto muy variable durante el año, gasto que aumenta notablemente poco después de las lluvias abundantes. En cambio, los manantiales de las Fuentes de Tlalpan, que están en las tobas (véanse láms. X, fig. 2 y XI, fig. 1), son de gasto mucho menos variable que los de Peña Pobre, no obstante estar más altos que estos últimos, y las lluvias no ejercen influencia inmediata en el gasto de los manantiales de las Fuentes. Según esto, el tiempo que el agua emplea desde la infiltración en la superficie del terreno hasta su salida al exterior por manantiales situados en los basaltos, es mucho menor que el tiempo que transcurre desde la infiltración del agua hasta su salida por manantiales situados en las tobas, diferencias debidas sin duda á la desigual velocidad con la cual circula el agua en el interior de los basaltos y tobas. Por otra parte, no es igual el régimen de los manantiales de las Fuentes de Tlalpan, de los del Santo Niño, y de los de Coxcomate, aunque todos ellos están en las tobas; y son de gasto muchísimo mayor los de las Fuentes que los otros, no obstante que los primeros están más altos que

los segundos. Todo esto comprueba que el agua circula en las tobas por trayectos independientes unos de los otros, aunque todos sean más ó menos superficiales, como lo indica la temperatura del agua que sale por todos estos manantiales, temperatura que es de 14° C.

El agua que se infiltra en los basaltos esponjosos y agrietados de las faldas del cerro del Xitle que descienden hacia el Norte, faldas comprendidas entre la hacienda de Eslava y los afloramientos andesíticos de los cerros Zacayuca y Zacatepec, desciende por las corrientes basálticas, pasa á las tobas detríticas subyacentes, y de éstas á las capas permeables que se hallan en el relleno de la cuenca de México. Es decir, que esas aguas contribuyen á la alimentación de las capas acuíferas que existen en el subsuelo de la planicie de México.

Dentro de la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de la zona La Magdalena-Tlalpan, se encuentran los pueblos del Ajusco, La Magdalena, Xicalco y San Andrés (véase lám. XIII), lo cual me obliga á hacer algunas consideraciones encaminadas á resolver: si la presencia de estos pueblos en la superficie de alimentación mencionada, podrá ocasionar alguna vez que el agua salga contaminada por los manantiales que se hallan en los alrededores de Tlalpan. Me ocupo de esta cuestión de salubridad porque soy de opinión, como lo he dicho en otras ocasiones,<sup>1</sup> que los análisis químico y microbiológico no son suficientes para resolver estas cuestiones, sino que es indispensable el estudio geológico de la región; pues no puede utilizarse una agua como potable aunque resulte muy pura según los análisis referidos, si ella está sujeta á causas de contaminación, y de nada sirve que sea buena hoy si puede ser mala mañana.

Antes se creía que toda agua por sólo el hecho de provenir directamente de un manantial era excelente, como si los manantiales fueran, dice Stainier,<sup>2</sup> aparatos misteriosos que la purificaran; pero por desgracia esto no es exacto, sino que los manantiales son únicamente los orificios de desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos; y por lo mismo, sólo que sean excelentes las aguas que circulan en estos receptáculos lo serán también las que salen por los manantiales, y en caso contrario, como sucede muchas veces, constante ó periódicamente las aguas de algunos manantiales están contaminadas y son detestables.

En el presente caso, la posición del pueblo del Ajusco no es desfavorable, pues aun cuando se contaminara el agua al infiltrarse en los alrededores de este pueblo, esa agua sufriría una autodepuración al descender por el depósito muy grueso de arena que existe en el subsuelo de la planicie del Ajusco, y cuando esa agua pasara al basalto estaría completamente purifi-

1 Juan D. Villarello. Hidrología subterránea de los alrededores de Querétaro. *Parergones del Instituto Geológico de México*. Tomo I, núm. 6, pág. 274.

2 Xavier Stainier. *Bull. Soc. Belg. Géol. Paleón. et d'Hydrol.* Tomo VII, 1893. Prosc. ver. página 150.

cada. Los otros pueblos mencionados no están en las mismas condiciones que el del Ajusco, porque si se contamina el agua al infiltrarse en el basalto de las cercanías de esos pueblos no se depura esa agua al circular por las grietas y cavidades del basalto, no sufre allí ninguna filtración, y saldrá contaminada por los manantiales, sobre todo por los que se hallan en esas corrientes basálticas. En vista de esto, y para evitar contaminaciones de las aguas subterráneas que circulan en la zona que he llamado La Magdalena-Tlalpan, la Autoridad competente debería proteger á la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, dictando las medidas adecuadas, prohibiendo hacer dentro de ellas sondeos, pozos y en general excavaciones cuya profundidad exceda de dos metros, y evitando sobre todo la ubicación de cementerios en esa superficie de alimentación. Sí, la ubicación de los cementerios es problema de resolución muy delicada, porque el agua que se infiltra en ellos puede arrastrar á los gérmenes morbosos por las grietas del terreno y llevarlos á largas distancias, contaminando así el agua de los receptáculos acuíferos subterráneos, y, por lo tanto, el agua de los manantiales que son los orificios de desagüe de estos receptáculos. En muchos casos se ha comprobado hasta la evidencia, que algunas de las epidemias desarrolladas en las poblaciones que emplean el agua de manantiales, como potable, son debidas á la contaminación de esta agua en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por esos manantiales.

En el caso de que me ocupo, con medidas preventivas severas y adecuadas, y con mucha vigilancia en la superficie de alimentación ya limitada, se evitará la contaminación de las aguas al infiltrarse en los basaltos, y se conseguirá así que siempre sean puras las aguas que salen por los manantiales de la zona La Magdalena-Tlalpan.

#### ZONA CUAUTZIN-TEUHCTLI-XOCHIMILCO

La zona que he llamado Cuautzín-Teuhctli-Xochimilco, está limitada al Poniente por los afloramientos andesíticos de los cerros Tehuehue y Xochitepec, y se prolonga hacia el Este para el cono volcánico llamado el Teuhctli. El subsuelo de toda esta región está constituido por corrientes basálticas apoyadas sobre las antiguas vertientes andesíticas de la serranía del Ajusco. Sobre los basaltos se encuentran arenas volcánicas en montículos, entre Topilejo y San Mateo Xalpa, y en lechos delgados en las planicies del Ajusco y Tulmiaquí. Sobre las arenas y también directamente sobre el basalto se encuentran tobas arenosas en las faldas del cerro Cuautzín. Dentro de la zona comprendida entre los pueblos San Lorenzo, San Andrés, San Salvador, San Pablo, San Pedro y Santa Cruz, en los lugares de poca pendiente se halla sobre el basalto material arcilloso mezclado con tierra vegetal.