

La superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en esta zona creo que puede limitarse aproximadamente como sigue: al Norte, por la extremidad de la corriente basáltica; al Este, de las faldas orientales del Teuchtli para el cerro Tlamolo; al Sur, por la cresta de la serranía del Ajusco; y al Poniente por los afloramientos andesíticos de Xochitepec y Tehuehue para el Oyameyo. Los coeficientes de infiltración de las rocas que afloran en la anterior superficie de terreno los indiqué ya como aproximados, en algunos de los párrafos anteriores; y por lo tanto, puede calcularse ya la cantidad de agua que anualmente se infiltra en la superficie de alimentación anterior, cantidad que como todas las semejantes, indicadas en este escrito, sólo puede considerarse como una primera aproximación, porque la falta de mejores datos permeométricos locales no permite llegar á resultados más cercanos de la verdad.

Los datos relativos á extensiones ocupadas por cada uno de los materiales que afloran en esta zona son los siguientes. Arenas en montículos en las faldas de los cerros de Topilejo, con coeficiente de infiltración 0.50, dos kilómetros cuadrados. Arenas en lechos delgados en una parte de la planicie del Ajusco, de los cerros Tehuehue y Topilejo al Sur para el Guarda, en la planicie de Tulmiaqui, etc., con coeficiente 0.70, dieciséis kilómetros cuadrados. Tobas arenosas y material arcilloso mezclado con tierra vegetal, en la falda Norte del cerro Cuautzín por los pueblos San Lucas, San Francisco, San Pablo, San Pedro y Santa Cruz (lám. XIII), con coeficiente 0.25, veinticinco kilómetros cuadrados. Basaltos esponjosos, porosos ó agrietados, con coeficiente 0.60, cuando más cincuenta kilómetros cuadrados del total afloramiento basáltico en esta zona, pues todo lo demás es basalto compacto casi impermeable. Con los datos anteriores, y aceptando por las razones ya indicadas, que setenta centímetros sea el promedio de la altura total de la lluvia en un año, se obtiene para la infiltración anual en esta zona la cantidad aproximada de: 33.915,000 metros cúbicos de agua. Es decir, que los receptáculos acuíferos subterráneos de la zona Cuautzín—Teuchtli—Xochimilco pueden proporcionar como promedio anual, un volumen de agua de 1,090 litros por segundo, aproximadamente. Una parte de esta cantidad de agua sale por los manantiales de Tepepan, La Noria, Quetzalapa, Nativitas, San Jerónimo, Santa Cruz, San Luis, etc., y otra porción constituye el contingente principal que reciben las capas acuíferas que hay en el subsuelo de la parte Sur de la planicie de México. En años muy lluviosos la infiltración anual será mayor que la indicada antes, y será menor en años escasos de precipitaciones acuosas.

La circulación del agua en el interior de las tobas, arenas y basaltos de esta región, la expliqué ya en detalle en párrafos anteriores; y por lo mismo, es inútil hacer repeticiones. Solamente diré: que en las arenas de Tulmiaqui se verifica la circulación del agua en condiciones muy semejantes á las que indiqué antes, al ocuparme de las arenas de los alrededores del Ocotál, en el río de la Magdalena; y que en Tulmiaqui como en el Ocotál, y

por idénticas razones, hay manantiales en las barranquillas que cortan al material arenoso, manantiales que son de gasto variable, y algunos de los cuales se secan durante varios meses del año.

El afloramiento basáltico bastante extenso situado al Sur de las zonas que he llamado La Magdalena-Tlalpan, y Cuautzín-Teuchtli-Xochimilco, es decir, las vertientes basálticas de la serranía del Ajusco que bajan al Sur para Cuernavaca, constituyen la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por los manantiales de los alrededores de Cuernavaca y Jiutepec, receptáculos esos que están separados de los que he mencionado en los párrafos anteriores, por el núcleo andesítico casi impermeable del Ajusco. Este núcleo desempeña un papel semejante al de la sierra andesítica llamada Zinziro, situada en las cercanías de Pátzcuaro, del Estado de Michoacán, sierra que separa á los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por los manantiales de Zacapú y el río Duero, de los que desaguan por la vertiente opuesta de la misma sierra hacia Pátzcuaro. Esta sierra andesítica impide la conexión entre el lago de Pátzcuaro y los manantiales de Zacapú y el río Duero, falta de conexión que pude comprobar en 1907 por medio del análisis químico de las aguas del lago y de los manantiales.¹

En la zona Cuautzín-Teuchtli-Xochimilco el agua circula en el interior de los basaltos por trayectos irregulares, difíciles de localizar desde la superficie del terreno. De estos conductos por lo general supercapilares y más ó menos independientes unos de otros, como he dicho ya, el agua penetra en las brechas y tobas sobre las que escurrieron las corrientes basálticas en la parte baja de la serranía del Ajusco, y de estas tobas pasa una parte del agua subterránea á las capas más permeables que se hallan en el relleno de la cuenca de México. Estas capas permeables, constituyen, como diré después, una zona de retención en donde el agua se acumula, y de donde sale una parte al exterior por algunos manantiales situados en el centro de la planicie de México, ó por varios pozos brotantes. El agua así acumulada regulariza el gasto de esos manantiales y pozos, y la diferencia entre la cantidad de este líquido que anualmente reciben las capas acuíferas mencionadas, y la que sale de estas capas al exterior, forma en ellas una reserva para los años secos. Según esto, en los meses de lluvias, que en la serranía del Ajusco son de Junio á Octubre, y principalmente Agosto y Septiembre, la cantidad de agua que pasa subterráneamente de los basaltos y tobas para las capas acuíferas de la planicie de México, es superior á la que sale de éstas en igual período de tiempo por los manantiales y pozos que acabo de mencionar. Ese exceso de agua llena los espacios vacíos existentes entonces en las capas acuíferas, y cuando estos receptáculos subterráneos de la planicie de México se encuentran ya completamente lle-

1 Juan D. Villarelo. Hidrología subterránea de los alrededores de Pátzcuaro, E. de Michoacán. *Parergones del Instituto Geológico de México*. Tomo II, núm. 6, págs. 358 á 362.

nos, el agua que desciende por los basaltos y tobas se acumula y sale en la zona de contacto entre estas rocas y las capas que constituyen el relleno del fondo de la cuenca, ocasionando la formación de ciénagas en esa zona de contacto. Esto explica la existencia del terreno cenagoso que hay al pie de la serranía del Ajusco, entre Xochimilco y San Luis.

La zona de contacto á que me he referido en los párrafos anteriores, se encuentra al pie de la serranía del Ajusco, de Tepepan por Nativitas, para Santa Cruz, San Luis, Tetelco y Tezompa. En esta zona se hallan, de Poniente á Oriente los siguientes grupos de manantiales: Tepepan, La Noria, Quetzalapa, Nativitas, Toxomulco, Santa Cruz, San Gregorio, San Luis, Tuyahualco, Iztapayoca y los de Mixquit, entre los pueblos de Tetelco y Tezompa (véase lám. XIII). Además de éstos se hallan otros varios manantiales en el lago de Xochimilco.

Esa zona de contacto situada al pie de la serranía del Ajusco es sumamente interesante y desempeña funciones de gran importancia. En efecto, estando constituido el subsuelo en esa zona por tobas, arenas y aluviones, es una esponja que recibe el agua subterránea que baja de la serranía del Ajusco por conductos más ó menos localizados, y la disemina en una gran extensión de terreno. De esta esponja, una parte del agua pasa como he dicho, para los estratos acuíferos intercalados en las capas arcillo-margosas del fondo de la cuenca; y otra parte del agua brota en varios lugares de la misma esponja, por cavidades en forma de embudo llamadas "ojos," como son la mayor parte de los manantiales mencionados en el párrafo anterior. Además, esta esponja constituye una reserva de agua que regulariza el gasto de los manantiales situados en ella, y por los cuales sale en años escasos de lluvias parte del agua acumulada en la misma esponja. Por otra parte, el gasto de los mismos manantiales no aumenta inmediatamente después de las precipitaciones acuosas en las faldas mencionadas del Ajusco, porque el agua subterránea que baja de estas últimas primero satura á la esponja á que me refiero, y á los estratos acuíferos del fondo de la cuenca, y luego hace aumentar el gasto normal de los manantiales situados en la misma esponja. Todo lo anterior está de acuerdo con los hechos observados, pues los manantiales que se hallan al pie de la sierra del Ajusco son de gasto poco variable, y que no aumenta inmediatamente después de las grandes precipitaciones acuosas.

Se comprende por lo anterior, que de esa esponja, de esa zona de acumulación que constituye una reserva de agua, puede extraerse gran cantidad de este líquido bombeándola por diversos pozos situados en la misma esponja; pero debe tenerse en cuenta, que al agotarse esa reserva sólo podrá extraerse después, la cantidad de agua que constituye la alimentación anual de la misma esponja.

En la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de la zona que he llamado Cuautzín-Teuchtli-Xochimilco, se encuentran varios pueblos sobre las corrientes basálticas de esa serranía.

(Véase lám. XIII.) Como el agua en su circulación subterránea por las grietas y cavidades del basalto no sufre ninguna autodepuración, si el agua se contaminara al infiltrarse en la superficie de alimentación ya limitada en las faldas de la serranía del Ajusco, saldría contaminada por los manantiales situados al pie de esa serranía, y llegaría contaminada también á la zona en la cual se va á hacer la captación de esas aguas, bombeándolas por pozos situados en la esponja á que me he referido en los párrafos anteriores. Estas aguas son las que se enviarán á la ciudad de México, destinándolas para el abastecimiento de agua potable en esta población; por lo tanto, creo que no debe economizarse medio alguno que tenga por objeto evitar la contaminación de esas aguas, sobre todo al infiltrarse en la superficie de alimentación mencionada, para lo cual deberá protegerse esta superficie aún más de lo que indiqué al hablar de la zona anterior, que designé con el nombre La Magdalena-Tlalpan.

Cuando se extrae por medio de bombas poderosas gran cantidad de agua del subsuelo, se forma alrededor del pozo por donde se hace la succión una zona débil, una zona de poca resistencia, hacia la cual acude el agua subterránea de una extensión de terreno bastante grande situada también alrededor del pozo mencionado. Esto tendrá que suceder en la región de que me ocupo, al bombear el agua por los pozos situados en esa esponja tantas veces mencionada; y al formarse esas zonas de menor resistencia, el agua infiltrada en un gran perímetro alrededor de cada pozo acudirá á cada uno de éstos, y de ellos será enviada para la ciudad de México. Por lo tanto, deben establecerse también amplios perímetros de protección alrededor de cada uno de los pozos por los cuales se hará la succión del agua, con objeto de impedir que esta agua se contamine casi al salir al exterior. En efecto, vigilando convenientemente la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos situados en las faldas basálticas de la serranía del Ajusco, se evitará que el agua se contamine al infiltrarse en la superficie del terreno; y esa agua llegará pura hasta la zona de contacto entre las rocas basálticas de la serranía y las sedimentarias lacustres que forman el relleno del fondo de la cuenca, es decir, llegará pura hasta la esponja que se halla al pie de la serranía del Ajusco, de Tepepan por Xochimilco para San Luis, etc. Pero si no se ejerce la misma vigilancia en la superficie de esta esponja, sobre todo dentro de un perímetro bastante amplio alrededor de cada pozo, el agua al infiltrarse en esta superficie de terreno podría contaminarse, y atraída esta agua por las bombas hacia los pozos donde se hace la succión, estas aguas contaminarían á las que llegaran al mismo pozo bajando subterráneamente por las faldas de la serranía del Ajusco. Según esto, aunque la vigilancia en la serranía del Ajusco fuera excelente, y aunque las aguas llegaran puras hasta las cercanías de los pozos por los cuales saldrán al exterior, descuidando la vigilancia en los alrededores de los pozos mencionados, esas aguas podrán contaminarse casi al salir al exterior.

Relativamente á poca distancia hacia el Este del lugar llamado La No-
ria, en donde se han instalado bombas poderosas para extraer entre 200 y
300 litros de agua por segundo, se encuentran los cerritos de Xilotepec
(véase lám. XIII). Al pie de estos cerritos hacia el Norte, está un cemen-
terio que creo deberá clausurarse, así como deberá impedirse en todo tiem-
po la ubicación de cementerios en toda esa zona situada al pie de la serranía
del Ajusco, entre Tepepan y San Luis. Los fundamentos de todo esto se
hallan en los párrafos anteriores; pero repito que por tratarse de las aguas
potables con que se proveerá á la ciudad de México, hay que ser nimios al
tratar de evitar toda causa de contaminación de las referidas aguas, por re-
mota que pudiera parecer cualquiera de esas causas.

CUENCA DE MÉXICO

Para completar el estudio hidrológico de la región que motiva este es-
crito, debo decir algunas palabras acerca de la circulación subterránea de
las aguas en el fondo de la cuenca de México, especialmente en la zona del
Sur.

Como dije en otro lugar, la mayor parte del fondo macizo de la cuenca
mencionada está constituido por andesitas, rocas que afloran en la planicie
de México formando varios cerros aislados.

Este fondo macizo es accidentado, y en varios lugares se levantan pi-
cachos de los cuales algunos no llegan hasta la superficie de la planicie,
pero que han sido alcanzados por la sonda, como dije antes. La andesita
constituye el fondo casi impermeable sobre el cual se apoyan los sedimen-
tos lacustres, constituidos por arcillas, margas, arcillas margosas y margas
arcillosas, intercaladas de diferentes maneras. Entre las capas anteriores
se hallan también tobas detríticas, arcillosas y arenosas, aluviones consti-
tuídos por matatenas de andesita de hyperstena principalmente, y lentes
y capas de arena suelta de grano grueso ó fino. En el centro de la planicie
el relleno es muy grueso, espesor que va disminuyendo al acercarse al pie
del lomerío por el Poniente y Sur de la cuenca de México. Al pie de este
lomerío el espesor de las tobas detríticas es considerable, y estas tobas se
extienden para el centro de la planicie, siendo cada vez más y más arcillo-
sas, pues se depositaban allí junto con los lodos del antiguo lago. Estas
tobas arcillosas y también arenosas, se encuentran intercaladas en las ar-
cillas y margas del relleno de la cuenca. Todas las capas anteriores están
en el centro de la planicie casi horizontales, y al pie de las serranías se ha-
llan por lo general ligeramente inclinadas hacia el centro de la cuenca.

Se ve por lo anterior, que en el relleno del fondo de la cuenca hay ca-
pas casi impermeables, las arcillo-margosas; capas poco permeables, las de
arcilla arenosa y de tobas; y capas muy permeables, las de arena de grano
grueso y las de aluvión. Según esto, los receptáculos acuíferos subterrá-

neos contenidos en el subsuelo de la planicie de México, están constituidos principalmente por los espacios vacíos comprendidos entre los granos de arena y entre las matatenas andesíticas, en las capas de arena y aluvión. Por este motivo designaré con los nombres de capas ó estratos acuíferos, á esos receptáculos subterráneos de la planicie de México. En estas capas ó estratos acuíferos de la planicie anterior, el agua se encuentra libre ó bajo presión hidrostática según es la permeabilidad de las capas que cubren á la acuífera. Cuando la permeabilidad de esas capas es igual ó mayor que la permeabilidad del estrato acuífero, el agua está libre, es una agua freática; en cambio, cuando es mucho menor la permeabilidad de la capa, ó de una parte de la capa, que cubre á la acuífera comparada con la permeabilidad de esta última, el agua está bajo presión hidrostática, cuando menos debajo de esa porción de capa mucho menos permeable que cubre á la acuífera. Es decir, que en el subsuelo de la planicie de México hay aguas freáticas, y también aguas artesianas. Estas últimas son brotantes en algunos lugares, como indicaré después.

El agua que alimenta á las capas acuíferas del subsuelo de la planicie de México, es principalmente, como dije ya, una porción de la que se infiltra en las faldas que descienden de las sierras del Ajusco y de las Cruces para la cuenca de México. Del agua infiltrada en estas faldas sale una gran parte por los manantiales de Chalco, Xochimilco, Tlalpan, hacienda de Es-lava, río de la Magdalena, El Desierto, Los Leones y Río Hondo, más de 380 manantiales situados en las faldas ó al pie de esas serranías; y el resto del agua alimenta á las capas acuíferas del fondo de la cuenca. Del agua que sale por los manantiales anteriores la mayor parte desciende por trayectos superficiales, y otra parte se infiltra de nuevo, y sigue su trayecto subterráneo hasta acumularse en los estratos acuíferos de la planicie de México.

El agua infiltrada en las faldas mencionadas de las serranías del Ajusco y de las Cruces, y que no sale por los manantiales anteriores, continúa su descenso subterráneo por las grietas de la andesita de hornblenda é hyperstena, ó por las cavidades del basalto, pasa en seguida á las tobas situadas al pie de las sierras y penetra luego á las capas lacustres que rellenan el fondo de la cuenca, acumulándose de preferencia en las capas más permeables de este relleno, en donde ocupa los espacios comprendidos entre los granos de arena ó las matatenas de aluvión, y forma así los estratos ó capas acuíferas del subsuelo de la planicie de México. Según esto, los estratos acuíferos del subsuelo de esta planicie deben considerarse como la zona de acumulación, como la parte inferior de los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en las faldas mencionadas de las serranías del Ajusco y de las Cruces. La superficie de alimentación, las regiones de alimentación y activa¹ de esos receptáculos, se hallan en la superficie y en el

¹ Véase J. D. Villarello. Hidrología interna de los alrededores de Cadereyta Méndez, Estado de Querétaro. *Parergones del Instituto Geológico de México*. Tomo I, núm. 6, 1904, pág. 184.

interior de las faldas de aquellas serranías; el nivel inferior de los manantiales está al pie de la serranía del Ajusco; y abajo de este nivel se halla la región acumulante constituida por los estratos acuíferos del fondo de la cuenca, en donde el agua es retenida. No es ésta una región pasiva, al menos en la parte superior, porque el agua circula en ella, y sale en parte al exterior por manantiales, como indicaré más adelante.

En la temporada de lluvias los estratos acuíferos de la planicie de México se llenan de agua, y una vez que esta región acumulante está saturada, aumenta el gasto de los manantiales situados al pie de la serranía del Ajusco, como dije ya, y sube el nivel del agua en los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en las faldas de las serranías del Ajusco y las Cruces. Este exceso de agua sirve de reserva para ir reemplazando á la que sale al exterior en la planicie de México por manantiales, por pozos brotantes, y también por medio de las bombas instaladas en los pozos artesianos.

La presión hidrostática se transmite en la arena y en los aluviones, aun cuando estos materiales opongan mucha resistencia al movimiento del agua; y como en el caso de que me ocupo, el agua se encuentra en los receptáculos acuíferos subterráneos á mayor altura, como acabo de decir, que las capas de arena ó de aluvión del subsuelo de la planicie de México, el agua en este subsuelo estará bajo presión hidrostática en todos aquellos lugares en que las capas de arena ó de aluvión estén cubiertas por estratos menos permeables que las referidas capas. Entonces, al perforar la sonda el estrato menos permeable que en ese lugar cubre á la capa acuífera, el agua sube, es artesiana, aunque no es en todas partes brotante.

Para que el agua subterránea pueda brotar en un lugar, es necesario que en ese lugar la superficie piezométrica se encuentre á mayor altura que la superficie del terreno; pues cuando es subterránea la primera de las superficies antes mencionadas, el agua es artesiana solamente, sube hasta la superficie piezométrica, pero no puede llegar hasta la superficie del terreno. Antiguamente, casi en toda la planicie de México la superficie piezométrica se encontraba más alta que la superficie del terreno, y el agua brotaba por casi todas las perforaciones que se hacían dentro de la siguiente zona: del pie de la serranía del Ajusco, por San Gregorio, Santa Cruz, Nativitas, Tepepan, Santo Niño, Huipulco y Coyoacán, para Chapultepec, Tacuba y Atzacotalco, y de la línea que pasa por estos lugares para la ciudad de México y lago de Texcoco. Al ir disminuyendo la altura que alcanza el agua en los receptáculos acuíferos subterráneos descritos en este estudio, ha ido bajando la superficie piezométrica, la cual es ya subterránea en el centro de la planicie de México. El nivel que el agua alcanza en los anteriores receptáculos acuíferos subterráneos ha ido bajando por dos causas combinadas: menor alimentación de esos receptáculos, al haber disminuído notablemente la infiltración del agua en las sierras mencionadas, debido esto principalmente á la destrucción del bosque, como se verá

después; y aumento en el desagüe de los mismos receptáculos, ocasionado por el gran número de pozos brotantes que se han abierto en la planicie, y por el bombeo de la gran cantidad de agua que se extrae por los pozos artesianos y por los manantiales de Chapultepec. El número de pozos perforados en la planicie de México es ya de 1,517, los cuales dan 397 litros por segundo;¹ y en los manantiales de Chapultepec se bombean en promedio 218 litros por segundo, según los datos publicados en el Boletín Oficial del Consejo Superior de Gobierno del Distrito Federal. Más adelante, cuando se haga en mayor escala el desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos á que me refiero, es decir, cuando funcionen todas las bombas poderosas que se han instalado al pie de la serranía del Ajusco, para proveer de agua potable á la ciudad de México, entonces, repito, bajará aún más probablemente la superficie piezométrica antes mencionada, la cual irá siendo poco á poco más subterránea. Este descenso de la superficie piezométrica irá reduciendo la zona de agua brotante, zona que se irá retirando poco á poco del centro de la planicie de México, é irá quedando reducida á una faja cada vez más angosta y cercana de la línea que indiqué antes, y que pasa al pie de las serranías del Ajusco y las Cruces.

Los estratos acuíferos con agua bajo presión hidrostática se encuentran en la planicie de México á distintas profundidades, como se verá por los siguientes datos aproximados, que he podido obtener. En la parte Sur, de Huipulco para el pie de la serranía del Ajusco 20 á 25 metros, y el agua es brotante. De Huipulco para Churubusco, 50 á 60 metros y todavía el agua es brotante. (Véase lám. XII, fig. 2.) De Churubusco para la ciudad de México la profundidad va aumentando de 60 para 100 metros, y el agua asciende cada vez menos, dejando de ser brotante al acercarse á la ciudad de México. En esta última, la profundidad de las capas artesianas varía como sigue: por el Poniente, de 50 á 80 metros; por el Norte, de 80 á 100; y en el centro, entre 100, 150, 180, 200 y aun 215 metros, pero el agua ya no brota. Fuera de la ciudad, hacia el Norte-Poniente, la profundidad va disminuyendo de 50 hasta 30 metros en Tacuba y Atzacapotzalco; y al Norte y Norte-Oriente de la ciudad es mayor de 80 metros. La temperatura de estas aguas artesianas es de 20 á 22° C.

Por los alrededores de Xico, como dije en otro lugar, se encuentran en el subsuelo capas de turba terrosa, desde la superficie del terreno hasta más de 100 metros de profundidad; y por los pozos abiertos en estos lugares, como sucede en el que se halla á 6 kilómetros al Poniente de Xico, brota el agua acompañada de gran cantidad de gas de pantanos. La presión de este gas hace que el agua brote á mayor altura de la que alcanzaría por la presión hidrostática solamente. La altura que alcanza el agua en el pozo brotante que acabo de mencionar, es de metro y medio sobre el suelo, altu-

1 Boletín Oficial del Consejo Superior de Gobierno del Distrito Federal. Tomo III. 1904, página 550.

ra que es solamente de 30 á 40 centímetros en los pozos de esa región, por los cuales brota el agua sólo por presión hidrostática. (Véase lám. XII, figura 2.) No solamente en los alrededores de Xico brota el agua acompañada de gases, sino que esto sucede también en otros lugares de la planicie de México, de Aragón para la villa de Guadalupe, principalmente. En esa zona el agua sale acompañada de gran cantidad de anhídrido carbónico (ácido carbónico), y el agua brota á veces á gran altura, 30 hasta 50 metros durante algún tiempo después de abierto el pozo. En seguida la altura va disminuyendo poco á poco hasta que dejan de ser brotantes los referidos pozos. El agua brota en esta región debido más bien á la presión del anhídrido carbónico que á la presión hidrostática.

Los cerros aislados que se levantan en la planicie de México, como por ejemplo: el de Chapultepec, el de La Estrella, el de Xico y el de Tlapacoyan, desempeñan una función muy interesante en la circulación de las aguas subterráneas en las cercanías de los mencionados cerros. En efecto, los flancos de estos últimos en su parte subterránea, interrumpen á los sedimentos lacustres que rellenan el fondo de la cuenca de México, y esa superficie de contacto entre la roca eruptiva del cerro y la sedimentaria del relleno de la cuenca, desempeña una función semejante á la de una perforación hecha en el mismo relleno, como se verá en seguida. Los cerros anteriores constituídos por rocas eruptivas, son muy poco permeables, mucho menos que la mayor parte de las capas sedimentarias del relleno de la cuenca; y por lo tanto constituyen obstáculos ó barreras casi impermeables que se oponen á la circulación fácil de las aguas subterráneas, las cuales en la planicie de México descienden principalmente del Sur para el Norte, y del Poniente hacia el Oriente, ó sea de las sierras del Sur y Poniente de la cuenca de México para el lago de Texcoco. Los estratos acuíferos con aguas artesianas del subsuelo de la planicie de México, son cortados también por estas barreras casi impermeables; y entonces, el agua de estos estratos no pudiendo atravesar fácilmente á los cerros mencionados, se detiene en la superficie de contacto entre estos cerros y los sedimentos lacustres; y como se encuentra bajo presión sube por esa superficie de contacto como lo haría por un pozo, y sale á veces al exterior por manantiales situados en el pie de esos cerros, y en las cercanías de la superficie de contacto varias veces mencionada. Como ejemplos de esta clase de manantiales en la planicie de México, citaré á los siguientes: los de Chapultepec, situados al pie y hacia el Sur de la colina del mismo nombre; los de Culhuacán, que se hallan en el pie y al Sur-Poniente del cerro de La Estrella, y los de Xico y Tlapacoyan.

Las capas de arena suelta, como he dicho varias veces en este escrito, no son igualmente permeables por todas partes, sino que su permeabilidad varía con las dimensiones del grano, aumentando á medida que este grano es más grueso. Según esto, el agua circula con más facilidad por determinados lugares de esas capas de arena, formando así una red de venas acuí-

feras. Esto explica por qué no dan igual resultado todos los pozos que cortan á las capas de arena; pues mientras unos son de gasto considerable, los que cortan á esas venas acuíferas, otros, aún cercanos y que cortan á la misma capa, son de gasto mucho menor, por encontrarse en la zona en que el agua circula con mayor dificultad en las referidas capas de arena suelta.

Concluído el estudio hidrológico de la región que motiva este escrito, paso á indicar de qué manera podría aumentarse el volumen de agua que anualmente circula por los receptáculos acuíferos subterráneos que he descrito, para lo cual tengo necesidad de referirme á la relación muy estrecha que existe entre la vegetación arbolada, y la circulación de las aguas superficiales y subterráneas.

LA VEGETACIÓN FORESTAL Y EL AUMENTO DE VOLUMEN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para aumentar el volumen de agua que anualmente circula en el subsuelo de las zonas á que este escrito se refiere, es necesario procurar se infiltre mayor cantidad de agua en las superficies de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos ya mencionados, es decir, es indispensable aumentar los coeficientes de infiltración de las rocas que afloran en esas superficies. Para conseguir esto, el único medio práctico es repoblar el bosque en las serranías que constituyen el borde meridional de la cuenca de México. Esta repoblación, como se verá en seguida, es necesaria, no sólo para aumentar el caudal de agua que sale por los manantiales de la región, sino que es indispensable hacerla para conservar el gasto actual de los mismos manantiales; pues si continúa la destrucción absurda é irracional de esas frondosas arboledas, el gasto de los manantiales irá disminuyendo poco á poco, en vez de aumentar como se necesita ahora que están ya para concluirse las obras de provisión de agua potable para la ciudad de México.

La vegetación forestal con sus despojos, ese revestimiento vivo y muerto, desempeña funciones tan interesantes como son entre otras las siguientes: forma una coraza vegetal, como se le ha llamado, que impide la erosión del suelo por las aguas corrientes superficiales; es una esponja que absorbe el agua con facilidad; sirve como pantalla que impide la evaporación rápida del agua absorbida; es un regulador de las corrientes de agua subterráneas y superficiales, constituye una defensa para las poblaciones cercanas, pues impide el régimen torrencial de los ríos, y por último, además de su benéfica influencia como agente climatológico é higiénico, uniformando la temperatura y humedad del aire, y purificando el ambiente, es un centro productor de abono que enriquece á los suelos cercanos.

Una cuestión que hasta ahora no puede considerarse resuelta de una manera general, es la influencia que los bosques ejercen sobre la distribu-

ción de las lluvias locales. Es cierto que en varias partes de Europa, por observaciones metódicas hechas durante treinta años, se ha concluído que la cantidad de lluvia aumenta de 15 á 20 por ciento en las cercanías de las grandes comarcas boscosas; pero no obstante esto, sin datos pluviométricos locales que sirvan de fundamento, no deben generalizarse los resultados anteriores. En el caso de que me ocupó no existen esos datos pluviométricos completos, y por lo tanto nada puedo asegurar por ahora, acerca de la influencia que en la repartición de las lluvias locales ejercería la abundante vegetación arbolada en las sierras, que por el Sur y Sur-Oeste limitan á la cuenca de México. Pero si nada puedo asegurar acerca de la cuestión local anterior, sí debo decir que, es innegable la influencia de la vegetación arbolada sobre la circulación superficial y subterránea de las aguas, en todo tiempo y en todo lugar.

Para que el agua pueda ejercer sobre el suelo su acción erosiva y de transporte, se necesita que circule libremente en la superficie del terreno, que allí se reuna aumentando su volumen y formando corrientes; y entonces, á medida que ese volumen es mayor y más grande la pendiente del terreno, la acción erosiva del agua es también mucho mayor. Cuando el suelo es impermeable ó casi impermeable y el terreno es bastante inclinado, la mayor parte del agua que recibe descendiendo superficialmente, se reúne en los arroyos y ríos, y no encontrando obstáculo alguno baja con rapidez formando á veces corrientes impetuosas, verdaderos torrentes que ocasionan la rápida erosión del terreno. En cambio, cuando el suelo es bastante permeable, la mayor parte del agua que recibe se infiltra, y por lo tanto son de poca ó ninguna importancia las corrientes superficiales, y entonces la erosión es casi nula. Según esto, aumentando la permeabilidad del suelo, y poniendo obstáculos para que el agua en su descenso por la superficie del terreno no se reuna formando arroyos y ríos torrenciales, se conseguirá nulificar ó reducir á un minimum la erosión del suelo por las aguas corrientes superficiales. Pues bien, tanto lo uno como lo otro, es decir, tanto el aumento en la permeabilidad del suelo, como los obstáculos que impidan la formación de corrientes de agua impetuosas, pueden conseguirse desarrollando la vegetación arbolada. En efecto, en los bosques se encuentra sobre el terreno una cubierta bastante gruesa por lo general, constituida en la parte superior por restos de vegetación, troncos, ramas, hojas caídas, y abajo hay gran cantidad de residuos vegetales en descomposición, ó sea, esa materia negra conocida con el nombre de "humus." El "humus" absorbe agua en cantidad que varía entre el 70 por ciento de su peso hasta cuatro veces su peso, según es la clase de materia vegetal de la cual proviene, y según es también el estado en que se encuentra la descomposición de esa materia. Según esto, el "humus" por una parte absorbe gran cantidad de agua que segrega de la circulación superficial, y por otra los troncos y ramas caídas así como las raíces de los árboles, son obstáculos innumerables que impiden la concentración instantánea de una gran masa de

agua, y por lo tanto la formación de los torrentes. Sí; para extinguir los torrentes el medio más eficaz ha sido siempre cubrir con vegetación forestal las montañas donde se forman. Las raíces de los árboles no solamente constituyen obstáculos que impiden la formación de torrentes, sino que consolidan el terreno y preservan á la tierra vegetal del rápido deslave. Se ve por lo anterior cuán justa ha sido la comparación que se ha hecho entre una coraza protectora y la vegetación arbolada que cubre á las montañas. Esta vegetación es la malla que protege al suelo, impidiendo su rápida erosión, pues aun en terrenos muy inclinados, esa vestidura de árboles no permite que se concentre instantáneamente una gran masa de agua, y por lo tanto las corrientes superficiales son de poca importancia y la erosión del suelo queda así reducida á un mínimum.

En varias partes de este escrito creo haber demostrado la necesidad de evitar la erosión de los depósitos cineríticos y arcillo-arenosos mezclados con tierra vegetal, que se encuentran tanto sobre la andesita de hornblenda é hyperstena, en la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, como sobre el basalto en la serranía del Ajusco. Estos depósitos constituyen la región principal de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de esa zona, y si desaparecen por erosión con ellos desaparecerán también los manantiales situados en los mismos depósitos, y disminuirá notablemente el gasto de los manantiales, que se hallan en la andesita de hornblenda é hyperstena y en el basalto, tendiendo entonces á ser estos manantiales de régimen más bien temporal que permanente. Para evitar esto, para que el régimen actual de todos los manantiales mencionados en este escrito no vaya disminuyendo poco á poco, sino que por el contrario aumente, hay necesidad de impedir la erosión de los depósitos cineríticos y detríticos de esa región, repoiendo la coraza vegetal, la vestidura de árboles en las serranías que se hallan al Sur y Sur-Oeste de la cuenca de México.

Como dije ya, el "humus" es un material excesivamente poroso, que segrega gran cantidad de agua de las corrientes superficiales, que retiene el agua de las grandes precipitaciones acuosas, retardando su movimiento en la superficie del terreno, y que facilita por lo tanto la infiltración de esa agua en el subsuelo. El "humus," según esto, es comparable á una esponja que puede absorber gran cantidad de agua, y que al retenerla impide su descenso rápido por los lugares muy inclinados del terreno.

En varios párrafos de este estudio, al ocuparme de los coeficientes de infiltración de las rocas, sobre todo de aquellas que afloran en las partes inclinadas de las superficies de alimentación, he dicho que: el agua de las lluvias voluminosas y de poca duración en su mayor parte desciende superficialmente, porque la velocidad de este descenso es mucho mayor que la de infiltración del agua por los poros y grietas de las rocas mencionadas. Este rápido descenso superficial ocasiona que el agua de esas fuertes lluvias no contribuya á la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos; y

por lo tanto es relativamente pequeño el coeficiente de infiltración de las rocas en esas condiciones, es decir, es pequeño el tanto por ciento que se infiltra del agua total recibida en el año por el afloramiento de las referidas rocas. Para que este coeficiente de infiltración aumente, y aumente por lo tanto el gasto de los manantiales, es necesario disminuir notablemente la velocidad del descenso superficial del agua hasta hacerla menor que la velocidad de infiltración, es decir, se necesita retardar el descenso del agua, para que ésta pueda ser absorbida á medida que el aire es expelido de las rocas del subsuelo. Todo esto se consigue como dije ya, reinstalando en las serranías mencionadas la cubierta vegetal viva y muerta, principalmente el "humus," que desempeña entre otras la función de esponja alimentadora de los receptáculos acuíferos subterráneos.

Para facilitar la infiltración del agua en los suelos duros y arcillosos, es preciso granularlos, pues entonces aumenta su porosidad. Esto se consigue con la adición del "humus," adición que es tanto más indispensable á medida que aumenta la cantidad de arcilla en el suelo y la inclinación del terreno, así como á medida que son más delgados los suelos arcillosos en las faldas de los cerros. Pues bien, en la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, existe como dije ya, un revestimiento arcillo-arenoso apoyado sobre la andesita de hornblenda é hyperstena en una gran parte de los cerros de esa región. El coeficiente de infiltración de este depósito arcillo-arenoso es pequeño por las razones que indiqué en otro lugar; pero en vista de lo anterior se aumentará notablemente ese coeficiente, y aumentará por lo tanto el gasto de los manantiales de la región, repoblando el bosque en los cerros de la Magdalena, pues entonces el "humus," al granular el suelo arcilloso, le asegurará mayor porosidad.

En los bosques, el follaje forma una especie de pantalla que impide la acción directa de los rayos solares sobre el suelo, y que se opone también al movimiento rápido de los vientos; y como tanto la elevación de temperatura por una parte, como por otra el movimiento rápido del viento, son agentes de evaporación muy enérgicos, esa pantalla vegetal al disminuir la energía de los agentes anteriores, disminuye notablemente la evaporación del agua infiltrada en el terreno.

En varias partes de este escrito he dicho que, el agua de las precipitaciones pluviales de poca duración no llega por lo general á los receptáculos acuíferos subterráneos de esa región, porque no infiltrándose más abajo de la zona influenciada por la evaporación, vuelve á la atmósfera casi en su totalidad. Pues bien, las condiciones pueden variar mucho al formar con la repoblación del bosque esa pantalla vegetal que disminuye la evaporación. Entonces esa agua infiltrada que hoy vuelve á la atmósfera por las razones que indiqué ya, continuará su movimiento de descenso subterráneo, alimentará á los receptáculos acuíferos del subsuelo, y contribuirá á aumentar notablemente el gasto de los manantiales.

Es cierto que para sus necesidades fisiológicas los árboles toman del

suelo por sus raíces determinada cantidad de agua, que transpiran y restituyen á la atmósfera enriqueciéndola en vapor de agua; pero esa cantidad fisiológicamente transpirada en las comarcas boscosas, es mucho menor que la físicamente evaporada en los lugares desprovistos de vegetación. Por este motivo en Australia se han llegado á formar manantiales en mesetas antes desnudas, efectuando solamente numerosas plantaciones. Por otra parte, ese vapor de agua que en regular cantidad existe en la atmósfera de las comarcas boscosas, contribuye al desarrollo espontáneo de la vegetación arbolada.

El revestimiento de despojos vegetales que cubre al suelo de las comarcas boscosas, esa esponja que absorbe y retiene el agua impidiendo su rápido descenso, es también un regulador de las corrientes de agua superficiales y subterráneas. En efecto, no pudiendo descender el agua con rapidez, no pudiendo concentrarse instantáneamente una gran masa de agua, las corrientes superficiales no llegan á tener un régimen torrencial, sino que el agua se acumula en esa esponja vegetal, y sirve de reserva garantizando el gasto permanente de las corrientes superficiales en tiempo de secas. De esta manera esa esponja vegetal es no solamente una defensa para las poblaciones cercanas, pues impide la formación de los torrentes, sino que al procurar uniformar el gasto de las corrientes superficiales, les da á éstas un valor comercial, porque permite su empleo para el riego y como fuerza motriz en cualquiera época del año. Por otra parte, esa agua acumulada en la referida esponja vegetal sirve de reserva para alimentar en tiempo de secas á los receptáculos acuíferos subterráneos, alimentación que al uniformarse de esta manera tiende á uniformar también el gasto de los manantiales, por los cuales desaguan los referidos receptáculos subterráneos.

En la zona del río de la Magdalena el agua se emplea como fuerza motriz; y por lo tanto es muy interesante que el agua que baja por ese río, y que proviene de corrientes superficiales y de manantiales, no disminuya notablemente en la temporada de secas. Para conseguir esto será suficiente, en vista de lo anterior, reponer la coraza vegetal en los cerros de los alrededores del río mencionado.

El "humus" es un abono asimilable que la vegetación forestal elabora con el transcurso del tiempo, aun en los suelos más estériles. Ese "humus" enriquece el suelo en materias azoadas y en principios minerales nutritivos. Por esto es que las aguas que bajan de las montañas revestidas de árboles, al transportar el "humus" y depositarlo en los terrenos cercanos, enriquecen al suelo con elementos fertilizadores. En cambio, cuando desaparece de las montañas esa coraza vegetal, el agua ejerciendo su acción erosiva intensa sobre las rocas del terreno, transporta en gran cantidad guijarros, matatenas, etc., las cuales al depositarse en las vegas cercanas esterilizan el suelo.

Creo que el contenido de los párrafos anteriores es fundadamente bas-

tante para poder asegurar que, el gasto de los manantiales es una función del revestimiento arbolado que existe en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, que desaguan por esos manantiales. En vista de esto, y para conservar y aumentar el gasto de todos los manantiales mencionados en este estudio, es indispensable que, las Autoridades competentes impartan una protección eficaz á la coraza vegetal que debe cubrir á las sierras del Ajusco y las Cruces, que se proceda á la reinstalación juiciosa de esa vestidura de árboles en las sierras anteriores, que se evite la destrucción absurda de las frondosas arboledas; y por último, que se reglamente la explotación de los bosques, siguiendo un plan científico, y oyendo la opinión de personas especialistas en la materia y dotadas de criterio recto y suficientemente ilustrado.

Indicada ya la manera práctica de aumentar el caudal de agua que anualmente circula en los receptáculos acuíferos subterráneos ya descritos, paso á ocuparme en lo relativo á las obras de captación.

OBRAS PARA LA CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Como se verá en seguida, las obras de captación de las aguas que circulan en el subsuelo pueden conducir á resultados muy distintos, según es la región del receptáculo acuífero subterráneo que ha sido cortada por las obras mencionadas.

Cuando las obras de captación se hacen en la superficie de terreno en donde se infiltran las aguas meteóricas, es decir, en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, ó cuando esas obras cortan solamente á la región de alimentación de los mismos receptáculos,¹ región ésta casi superficial, puede decirse que, el éxito de las obras referidas es casi nulo, y que estas últimas son más bien nocivas que benéficas á la circulación subterránea de las aguas meteóricas. En efecto, en la superficie de alimentación y en la región de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, hay agua solamente en la época de lluvias, el agua en esos lugares es por lo tanto temporal y no permanente; y por lo mismo, por las referidas obras saldría agua sólo en tiempo de lluvias. Es decir, que con estas obras únicamente se consigue impedir la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, pues ellas hacen salir el agua al exterior cuando apenas comienza á infiltrarse en el terreno. En vista de todo esto, no deben recomendarse obras de captación que corten únicamente á la superficie y región de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos.

Cuando las obras de captación á que me refiero cortan á la región activa de los mismos receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, á la región

1 J. D. Villarello. Hidrología interna de los alrededores de Cadereyta Méndez. L. c. pág. 184.

que contiene agua en todo el año y que desagua por manantiales, pueden presentarse dos casos: ó el corte se hace arriba de los manantiales, ó se hace al nivel inferior de los manantiales. En el primer caso, las obras de captación impiden que el agua continúe su descenso subterráneo, y la obligan á salir al exterior á un nivel más elevado; por lo tanto, los manantiales se secan ó su gasto se reduce notablemente. Si es muy abundante la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, las obras mencionadas al facilitar el desagüe de estos receptáculos, permitirán que salga por ellas anualmente mayor cantidad de agua de la que en igual tiempo salía antes por los manantiales; pero si la alimentación referida no es muy abundante, con esas obras sólo se consigue que el agua salga á mayor altura, al secarse los manantiales inferiores, pero su volumen no aumenta; ó en caso de aumentar no es permanente sino temporal, desapareciendo en tiempo de secas. Cuando las obras de captación se hacen al nivel inferior de los manantiales, como facilitan ellas el desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos, se consigue como en el caso anterior una de dos cosas: si la alimentación de estos receptáculos es abundante, aumenta con las obras la cantidad de agua que anualmente sale al exterior; pero si esa alimentación no es abundante, no será permanente el aumento en el volumen de agua subterránea que salga al exterior, sino que este volumen llegará á ser nulo, ó casi nulo en la temporada de secas.

Cuando las obras de captación cortan á la región acumulante ó á la región pasiva de los receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, á las regiones que se hallan abajo del nivel inferior de los manantiales, aumenta la cantidad de agua que sale al exterior. En efecto, el nivel más bajo del desagüe natural de los referidos receptáculos subterráneos es el nivel inferior de los manantiales, de aquí para abajo el agua está retenida; pero al cortarse esta región acumulante por obras que permitan su desagüe al exterior, saldrá toda el agua contenida desde el nivel inferior de los manantiales hasta el nivel de las obras de captación, y saldrá también el agua que anualmente se infiltre hasta el nivel de las referidas obras. Según esto, en una primera temporada será mucha la cantidad de agua que pueda salir por las obras de captación, porque entonces existe una reserva de agua acumulada en muchos años; pero después, á medida que esa reserva vaya siendo menor el volumen de agua que salga por las obras irá siendo también cada vez menor, hasta que anualmente este volumen sea cuando más igual á la cantidad de agua que durante el año se infiltre hasta la región del receptáculo acuífero subterráneo, que haya sido cortada por las obras de captación. En muchos casos sucede que el agua encuentra menos resistencias siguiendo los conductos que la llevan hasta las obras de captación, situadas abajo de los manantiales, que continuando su trayecto hacia estos últimos. Entonces, los manantiales se secan, y el agua prolonga su descenso subterráneo hasta llegar á las obras mencionadas, y sale por ellas. De estos casos uno muy interesante se presenta cuando es ascendente la

última parte del trayecto subterráneo que sigue el agua para salir por los manantiales, como sucede muchas veces, sobre todo si las aguas son termales;¹ entonces, las obras de captación situadas abajo del nivel de los manantiales, al cortar á ese tramo ascendente de la circulación acuífera subterránea, proporciona una salida más fácil, y el agua sale por ellas en vez de continuar su ascenso hasta los manantiales, los cuales se secan por este motivo, ó su gasto disminuye notablemente. En ese último trayecto ascendente, el agua puede subir hasta cierto punto como límite, este punto ha sido llamado por Belgrand "punto hidrostático." Según esto, los manantiales se encontrarán cuando más á la altura de este punto; porque más arriba el agua ya no podría brotar. En cambio, á medida que esté más bajo el punto de desagüe en ese trayecto subterráneo ascendente, será mayor la presión hidrostática en ese punto; y por lo mismo, será mayor la cantidad de agua que salga por él. Por este motivo, cuando las obras de captación cortan á esos trayectos subterráneos ascendentes, la cantidad de agua que sale por ellas es mayor que el gasto de los manantiales situados arriba y que se secan. Este aumento en la cantidad de agua que sale al exterior será permanente cuando sea abundante la alimentación del receptáculo acuífero subterráneo, y éste sea bastante considerable; porque entonces, aun cuando se facilite el desagüe de ese receptáculo, la cantidad de agua contenida en el subsuelo será suficiente para garantizar la salida de este líquido durante todo el año, por las referidas obras de captación.

Cuando un receptáculo acuífero subterráneo no tiene desagüe natural, cuando no tiene manantiales, entonces no hay región activa en ese receptáculo, sino que toda la parte que se halla abajo de la región de alimentación debe considerarse como zona de retención, ó región acumulante; y por lo mismo, las obras de captación que corten á este receptáculo abajo de la región de alimentación, conducirán á los resultados que he indicado en el párrafo anterior, es decir, que esas obras en todo caso ocasionarán un aumento en la cantidad de agua que sale al exterior.

Las obras de captación pueden ser horizontales ó verticales, es decir, socavones ó pozos. Los primeros sólo pueden darse cuando lo permite la topografía del terreno; y los segundos cuando puede localizarse el trayecto del agua en el subsuelo, problema éste relativamente fácil cuando las rocas son de permeabilidad continua, y muy difícil cuando la permeabilidad de las rocas está localizada en las fracturas que las cortan.

Teniendo en cuenta las consideraciones generales anteriores, paso á indicar en particular para cada una de las zonas en que dividí la región que motiva este estudio, cuáles obras pueden recomendarse para aumentar la cantidad de agua que actualmente sale de los receptáculos acuíferos subterráneos ya descritos.

¹ J. D. Villarelo. Hidrología subterránea de los alrededores de Montenegro (E. de Querétaro). *Bol. Soc. Geol. Mexicana*. Tomo V, pág. 25.

En la zona del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, no deben perforarse pozos, por dos razones: no se pueden localizar con exactitud desde la superficie del terreno los trayectos irregulares que sigue el agua en su circulación subterránea, por las grietas de las andesitas de hornblenda é hyperstena; y por otra parte, la topografía del terreno, su gran desnivel, permite la apertura de socavones. Estos socavones pueden abrirse en la andesita mencionada, á nivel de los manantiales, y siguiendo á las grietas por donde el agua circula, para después abrir cruceros con objeto de cortar otras grietas paralelas. Sin embargo, estos socavones en la andesita no deberán abrirse antes de reponer la vestidura de árboles en esos cerros; porque como dije en otro lugar, la mayor parte del agua que ahora circula en el subsuelo de la zona de unión entre las sierras del Ajusco y las Cruces, sale al exterior por los manantiales de esa región; y por lo mismo, esos socavones no harían aumentar de una manera considerable la cantidad de agua que actualmente sale al exterior. Es necesario comenzar por aumentar la alimentación acuífera de esos receptáculos subterráneos, y esto sólo puede conseguirse con la repoblación del bosque en esa zona. Por ahora únicamente pueden recomendarse como obras de captación de aguas subterráneas en esta zona las siguientes: en el río de la Magdalena, en el lugar llamado el Ocotal, abrir tres socavones al mismo nivel, uno al Norte-Poniente hacia el cerro de Coaxoyaque, otro al Sur-Poniente para Cieneguillitas, y otro al Sur-Este en los cerros del Ocotal. Estos socavones permitirían el desagüe más fácil del revestimiento arenoso que se halla en esos cerros; y aunque por ahora el aumento en la cantidad de agua que saliera al exterior no será muy considerable, sí lo sería al reponer la vegetación arbolada en los alrededores de Cieneguillas, vegetación que también haría disminuir notablemente la evaporación del agua en sus trayectos superficiales.

Sería inútil perforar pozos en el lomerío tobozo que se halla al Norte-Oriente de la zona que he llamado del río de la Magdalena y hacienda de Eslava, porque allí el agua está muy profunda y sin presión, por lo cual no podría brotar. Mas abajo, por San Angel, el agua tampoco es brotante pero se puede extraer con bomba de las perforaciones profundas.

En la zona que he designado con el nombre de La Magdalena-Tlalpan, no deben perforarse pozos por razones idénticas á las ya indicadas al principio del párrafo anterior; y no deben perforarse en las planicies arenosas escalonadas que se hallan en esa zona, como es la del Ajusco, porque son ellas superficies de alimentación, y nunca pueden ser brotantes los pozos perforados en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos. Como dije en otro lugar, el agua que circula en la región activa de los receptáculos acuíferos subterráneos de esta zona, situados en

las faldas de la serranía del Ajusco, sale en parte por los manantiales de Peña Pobre, Las Fuentes, y los de Tlalpan, y otra parte desciende al subsuelo de la planicie de México, y allí se acumula en los estratos acuíferos ya descritos. Según esto, los socavones abiertos en las faldas del Ajusco, arriba de los manantiales, únicamente impedirían que el agua descendiera para el subsuelo de México, y ocasionaría se secaran los manantiales que acabo de mencionar. Es decir, que al cortar esos socavones á la región activa de los receptáculos acuíferos subterráneos, saldría el agua al exterior á mayor altura, y en cantidad más ó menos igual á la suma de la que actualmente sale por los manantiales, más la que desciende para el subsuelo de la planicie de México. Entre los socavones que tenderían á alcanzar este resultado, podría indicar al que se abriera en las cercanías del pueblo San Andrés Acuayuca hacia el Sur-Oeste, pasando por debajo del revestimiento arenoso muy grueso de los alrededores de la Magdalena.

De la zona Cuautzín-Teuhetli-Xochimilco debo decir lo mismo que de la anterior, y por idénticas razones. Es decir, no se deben abrir pozos en esa zona, ni aun en las planicies arenosas y tobosas comprendidas dentro de ella; y los socavones abiertos en las faldas de esa serranía, y que cortarían á la región activa de los receptáculos acuíferos subterráneos sólo harían salir, cuando menos en parte, al agua que actualmente brota por los manantiales situados en el pie de esa serranía, y también á una parte del agua que alimenta á los estratos acuíferos del subsuelo de la planicie de México.

En la planicie de México, del pie de las sierras que limitan á la cuenca por el Sur y el Oeste para el centro de la planicie, sólo pueden abrirse pozos, los cuales serán brotantes en la zona ya limitada en otro lugar, y por los simplemente artesianos se puede sacar agua con bombas. Entre éstos los más interesantes serán los perforados en el pie de la serranía del Ajusco, de Tepepan por Nativitas para San Gregorio y San Luis, como son los que se van á aprovechar para la provisión de agua potable de la ciudad de México. Los pozos situados en esta parte, la más meridional de la planicie de México, corta á la parte alta de la zona de acumulación de los receptáculos acuíferos ya descritos, á la región por donde pasa el agua subterránea de las faldas del Ajusco para los estratos acuíferos del subsuelo de la planicie; y por lo mismo, son los pozos por los cuales en todo tiempo se podría bombear mayor cantidad de agua relativamente. Sin embargo, aunque en una primera temporada será muy considerable la cantidad de agua que se podrá extraer por los pozos mencionados, esta cantidad irá disminuyendo poco á poco hasta ser en el año cuando más igual al volumen de agua que anualmente se infiltre, y llegue subterráneamente hasta la región acumu-

lante cortada por esos pozos. En efecto, como en el subsuelo de la planicie de México existe una reserva de agua, acumulada durante muchos años, en esa primera temporada de bombeo activo, se irá extrayendo agua de esta reserva, y será muy considerable el volumen de este líquido que salga por esos pozos; pero á medida que la reserva se vaya agotando, irá disminuyendo el volumen de agua extraído, y cuando la reserva se acabe, sólo podrá extraerse por los pozos en determinado tiempo, cuando más el mismo volumen de agua que en igual período de tiempo llegue subterráneamente hasta la región cortada por el pozo. Esta cantidad aumentará ó disminuirá con el aumento ó disminución en la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, aumentará en los años abundantes en precipitaciones acuosas, y disminuirá en los años escasos de lluvias. También aumentará esa cantidad de agua, por las razones ya indicadas, cuando se reponga la coraza vegetal, la vestidura de árboles de esas serranías; y seguirá disminuyendo esa cantidad de agua, si continúa la destrucción de las frondosas arboledas en el borde meridional de la gran cuenca de México.

CONCLUSIONES

Resumiendo el contenido de estos apuntes se llega á las siguientes conclusiones:

Las sierras del Ajusco y las Cruces, con las de Monte Alto y Monte Bajo, limitan por el Sur y Poniente á la cuenca de México, y en la zona de unión de la primera con la segunda es en donde se hallan las barrancas principales de toda la región.

El macizo montañoso del Ajusco establece la división de las aguas superficiales que por el Norte descienden para la cuenca de México, de las que por el Sur bajan para el valle de Cuautla; y el núcleo andesítico de esta misma serranía es la barrera impermeable que separa á las aguas subterráneas que al Norte brotan en parte por los manantiales de Tlalpan, Xochimilco y Chalco, de los que al Sur salen por los manantiales de Cuernavaca, Fuentes de Chapultepec (E. de Morelos) y Jiutepec.

En estas serranías las zonas andesíticas están por lo general muy accidentadas, se encuentran en ellas cortes más ó menos profundos, la forma redonda es la que domina en el relieve del terreno, y los cráteres andesíticos han desaparecido casi por completo. En cambio, las zonas basálticas están menos accidentadas, las barrancas son en ellas muy escasas, la superficie del terreno es escoriácea, y aún se conservan allí los aparatos crateriformes que en gran número se encuentran en las vertientes del macizo

montañoso del Ajusco, y por los cuales tuvieron lugar las erupciones basálticas.

El núcleo del macizo montañoso del Ajusco y de la sierra de las Cruces está constituido por andesita de hornblenda, perteneciente al Mioceno. Posteriormente á las erupciones de andesita de hornblenda tuvieron lugar las de andesita de hornblenda é hyperstena, probablemente á principios del Plioceno. Como acompañantes de las andesitas, y emitidas en el período brechógeno de esas erupciones, aparecieron las brechas pomosas que se depositaron en las faldas de las sierras andesíticas. Las brechas, principalmente al pie de las sierras mencionadas, están cubiertas con el producto de la desintegración de ellas mismas. Estos detritus acarreados por el agua y depositados más abajo en forma de estratos irregulares y poco inclinados, constituyen las tobas detríticas que son tan abundantes, tanto en el lomerío que se levanta al Sur y Poniente de la cuenca de México, como en el relleno de la misma cuenca.

El período de actividad eruptiva en la región que motiva este escrito, no terminó en el Plioceno, con las erupciones de andesita de hornblenda é hyperstena, sino que después y con intermitencias no muy grandes tuvieron lugar las erupciones de andesita de hyperstena, y las de basaltos cuaternarios y recientes. Las erupciones basálticas fueron acompañadas con abundantes emisiones cineríticas, arenas volcánicas que en forma de montículos se depositaron sobre los basaltos y las andesitas, y que acarreadas después por las aguas se han depositado en lechos delgados y con poca inclinación sobre los basaltos y también sobre las andesitas. Los basaltos cuaternarios y recientes cortaron y en partes cubrieron á la andesita de hornblenda de la serranía del Ajusco, habiendo verificado sus emisiones eruptivas por aparatos crateriformes situados en las vertientes andesíticas de esa serranía, tanto en las que por el Norte descienden para la cuenca de México, como en las que hacia el Sur bajan para Cuernavaca y el valle de Cuautla en el Estado de Morelos.

Las andesitas de hornblenda é hyperstena están cubiertas en varios lugares por un revestimiento cinerítico, ó arcillo-arenoso mezclado con tierra vegetal, sobre todo en la zona de unión entre la sierra de las cruces y el macizo montañoso del Ajusco.

Una gran parte del fondo macizo de la cuenca de México está constituido por andesitas sobre las cuales se apoyan: brechas, tobas detríticas, arcilla, marga, arcilla margosa, marga arcillosa, en capas intercaladas de diversas maneras; y entre las cuales se encuentran también capas ó lentes de arena suelta, y aluviones constituidos principalmente por matatenas de andesita.

En la región estudiada afloran rocas coherentes, poco coherentes é incoherentes, ó sea, 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 ande-

sita 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 detríticas, y también las arcillas arenosas ó mezcladas con tierra vegetal. Como materiales incoherentes ó muy porosos hay en las mismas serranías: cenizas y arenas volcánicas en montículos ó en lechos delgados, y aluviones constituidos por matatenas de andesita principalmente. Los materiales anteriores, en el borde meridional de la cuenca de México, pueden colocarse en 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.

La superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que en parte desaguan por los manantiales del río de la Magdalena, y por los de 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 este último y la sierra de las Cruces. La cantidad de agua que salga por esos manantiales será proporcional por lo tanto al volumen de agua que se infiltre en la superficie de alimentación que acabo de indicar.

La circulación subterránea del agua en las faldas del Ajusco tiene lugar solamente en el interior del edificio basáltico que se apoya en las antiguas vertientes andesíticas de esa serranía, es decir, que tiene lugar únicamente en una zona superficial relativamente poco gruesa, bastante inclinada, y que se apoya en la andesita impermeable que constituye el núcleo de ese macizo montañoso.

Los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en la andesita de hornblenda é hyperstena del río de la Magdalena y de la hacienda de Eslava, están constituidos por los espacios vacíos existentes en las grietas que surcan á esa roca eruptiva, espacios que forman una red de venas acuíferas, más ó menos irregulares, y contenidas en los tramos de roca más ampliamente fracturados.

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 estos manantiales se hallan á corta distancia y no muy abajo de la superficie de terreno en donde se infiltran las aguas meteóricas que salen por los referidos manantiales.

Las aguas infiltradas en el basalto del Ajusco, ya sea directamente, en las partes porosas ó agrietadas del afloramiento de esta roca, ó bien por intermedio de los depósitos arenosos ó tobosos que cubren en partes á la misma roca, circulan en el interior del basalto por conductos irregulares y más ó menos amplios. Según esto, los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el edificio basáltico del Ajusco, están constituidos por los poros ó espacios vacíos contenidos en las arenas y tobas arenosas, y por las grie-

tas 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, y pasa en seguida á los basaltos en los cuales circula por grietas, venas y grandes cavidades, trayectos subterráneos éstos tan irregulares como difícil es localizarlos desde la superficie del terreno. Una parte del agua sale del basalto por manantiales situados en el borde ó extremidad de las corrientes de esta roca, y otra parte del agua pasa de las grietas del basalto á las brechas y tobas que le sirven de apoyo en la parte baja de la serranía, y de estas pasa subterráneamente cierta cantidad de agua para las capas acuíferas que se hallan en el subsuelo de la planicie de México.

Para evitar la contaminación de las aguas que salen por los manantiales de la región que motiva estos apuntes, la Autoridad competente debería proteger á las superficies de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, dictando las medidas adecuadas, prohibiendo hacer dentro de ellas sondeos, pozos, y en general excavaciones de más de dos metros de profundidad, y evitando sobre todo la ubicación de cementerios en esas superficies de alimentación.

Los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en el subsuelo de la planicie de México, están constituídos principalmente por los espacios vacíos contenidos entre los granos de arena, y entre las matatenas andesíticas, en las capas de arena ó de aluvi6n que se hallan intercaladas en las arcillas y margas que rellenan el fondo de la cuenca. En esos estratos acuíferos el agua se encuentra libre ó bajo presi6n hidrostática, seg6n es la permeabilidad de la capa que cubre á la acuífera, es decir, que en el subsuelo de la planicie de México hay aguas freáticas y también artesianas. Estas últimas son brotantes en una faja de terreno cada vez más angosta y cercana al pie de las sierras del Ajusco y las Cruces.

Para aumentar el volumen de agua que anualmente circula en el subsuelo de la región estudiada, es necesario procurar se infiltre mayor cantidad de agua en las superficies de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de la mencionada región, para lo cual el único medio práctico es repoblar el bosque en las serranías que constituyen el borde meridional de la cuenca de México.

En los alrededores del río de la Magdalena y hacienda de Eslava es inútil perforar pozos, para aumentar la cantidad de agua que actualmente sale de los receptáculos acuíferos subterráneos de esa región, y sólo pueden recomendarse como obras de captaci6n en esa zona, los socavones en la andesita, y en el revestimiento arenoso de los alrededores del Ocotál. Al reponer la vegetaci6n arbolada en esa zona disminuirán notablemente las pérdidas de agua por evaporaci6n; y haciendo impermeables los canales por donde pasa el agua de los manantiales se evitará que esta agua vuelva á infiltrarse en el suelo.

Los socavones que se abrieran en las faldas basálticas del Ajusco, únicamente impedirían que el agua subterránea descendiera para la planicie

de México; y harían salir al menos en parte el agua que actualmente brota por los manantiales situados al pie de esa serranía, y también á una parte del agua que alimenta á los estratos acuíferos del subsuelo de la planicie de México.

Por los pozos situados al pie de la serranía del Ajusco puede extraerse desde luego una cantidad de agua muy considerable, porque en la actualidad existe en el subsuelo una gran reserva de agua acumulada durante muchos años; pero á medida que esta reserva se vaya agotando irá disminuyendo el volumen de agua que se pueda extraer por los mismos pozos, y cuando esa reserva se acabe, podrá extraerse cuando más la cantidad de agua que constituye la alimentación anual de esos receptáculos acuíferos subterráneos. Esta cantidad aumentará en los años abundantes en precipitaciones acuosas y disminuirá en los años escasos de lluvias. También aumentará esa cantidad de agua al reponer la vestidura de árboles de esas serranías; pero disminuirá si continúa la destrucción de las frondosas arboledas en el borde meridional de la cuenca de México.

México, Noviembre de 1909.

