

diferente dureza, como acontece en la hacienda del Salto, donde termina el tajo de Nochistongo á la entrada del valle de Tula, y en el Salto de San Anton cerca de Cuernavaca.

Caida de agua
en la hacienda
del Salto.

En la hacienda del Salto se ve una formacion basáltica, tendiendo á la forma columnar, y descansando sobre capas de toba y de marga; el agua cae de una altura de cerca de 12 metros, dividiéndose en varios chorros que se rompen en las desigualdades de las masas basálticas. En este salto se ve que el desnivel se ha formado por la accion erosiva del agua sobre la roca más blanda que sostiene el basalto; por esta causa la masa de basalto va quedando volada como una corniza, y acaba por caer; verificado este hecho, vuelve el agua á minar la base del corte donde está la roca más blanda, y vuelve á caer una nueva masa de basalto; así es que el origen de la caida va retrocediendo con el tiempo.

Salto de San
Anton.

El Salto de San Anton en Cuernavaca presenta dos formaciones diferentes, como el anterior, de las mismas rocas que éste y en igual orden de sobreposicion. En San Anton la formacion basáltica está constituida por prismas bien desarrollados, con seccion pentagonal, como se ve en la lámina adjunta. El chorro de agua cae en una barranca profunda y de paredes aproximadas, que en su mayor parte están cubiertas de exuberante vegetacion; en el borde de la caida hay un árbol de higuera (*ficus*) que emite un hacecillo de gruesas raíces en direccion del chorro, y las aguas le toman por guía adhiriéndose á él hasta caer al fondo del arroyo. La altura de la caida es de cerca de 40 metros, y hácia la mitad de esta distancia hay una gruta, cavada sobre la toba, desde donde puede verse el cauce del arroyo en una grande extension.

Salto de Juanacatlan.

En el Salto de Juanacatlan, la cortina de agua llega hasta 146 metros de longitud y su caida es de 17 metros. Se precipita en una grada de basalto escorioso, cuyos accidentes favorecen la division de las aguas formando borbotones de blanca espuma que embellecen más aquel magnífico salto.

Aguas subterráneas.

Aguas subterráneas son aquellas que circulan entre las capas terrestres. Las aguas pluviales al caer sobre la tierra corren



Photo. E. Bernard et Cie

71, rue Lacondamine.

SALTO DE SAN ANTON
ESTADO DE MORELOS. — MÉXICO

unas sobre las superficies, otras penetran en las rocas y otras se evaporan, sea directamente ó por medio de las plantas. Las aguas que penetran las masas de rocas son las que van á formar las corrientes subterráneas, como se dijo al hablar del origen de los manantiales.

Division de las aguas pluviales.

Se comprende que la cantidad de agua absorbida varía con la naturaleza y forma de las rocas, con las inclinaciones de las superficies, con el revestimiento que puede cubrirlas, como la vegetacion herbácea ó arborescente, etc., etc.

La cantidad de agua absorbida varía segun las rocas.

El agua absorbida puede ir descendiendo bajo la forma de pequeñas gotas; éstas se unirán para formar hilos de agua que á su vez puedan asociarse y formar corrientes bajo la tierra, como se observa al exterior despues de una lluvia.

Formacion de las corrientes subterráneas.

Las formas y volúmenes de las corrientes y depósitos subterráneos, dependerán de la naturaleza de las rocas que les dan paso y los contienen. Si nos referimos, p. e., á una masa de rocas estratificadas, las aguas correrán sobre sus superficies, y al encontrar los planos de estratificacion, se introducirán allí y seguirán su curso por las grietas que aquellos les presenten; si un nuevo plano ó resquebrajadura corta aquella direccion, el agua continuará su camino por la segunda grieta y así sucesivamente. En las rocas no estratificadas las aguas seguirán las hendiduras de los planos de separacion que dividen á las masas en *blocs* ó cuartones, como ántes se ha hecho notar respecto de los pórfidos.

Rocas permeables é impermeables.

En ese paso de las aguas á través de las rocas, es claro que influye en el más alto grado el estado de porosidad ó de impermeabilidad de las masas, y sobre estas propiedades debe fijar su atencion el hidróscopo.

Si una capa de agua va pasando con dificultad por un plano de separacion entre dos rocas impermeables, y uno de esos planos, por la alteracion de la roca ú otra causa, se hace permeable, es claro que la corriente se filtrará é irá á seguir su curso sobre otro plano, grieta ó cualquier paso que le facilite más su circulacion.

Alternacion de capas de diferente permeabilidad.

Este estudio de las aguas subterráneas es de la mayor utili-

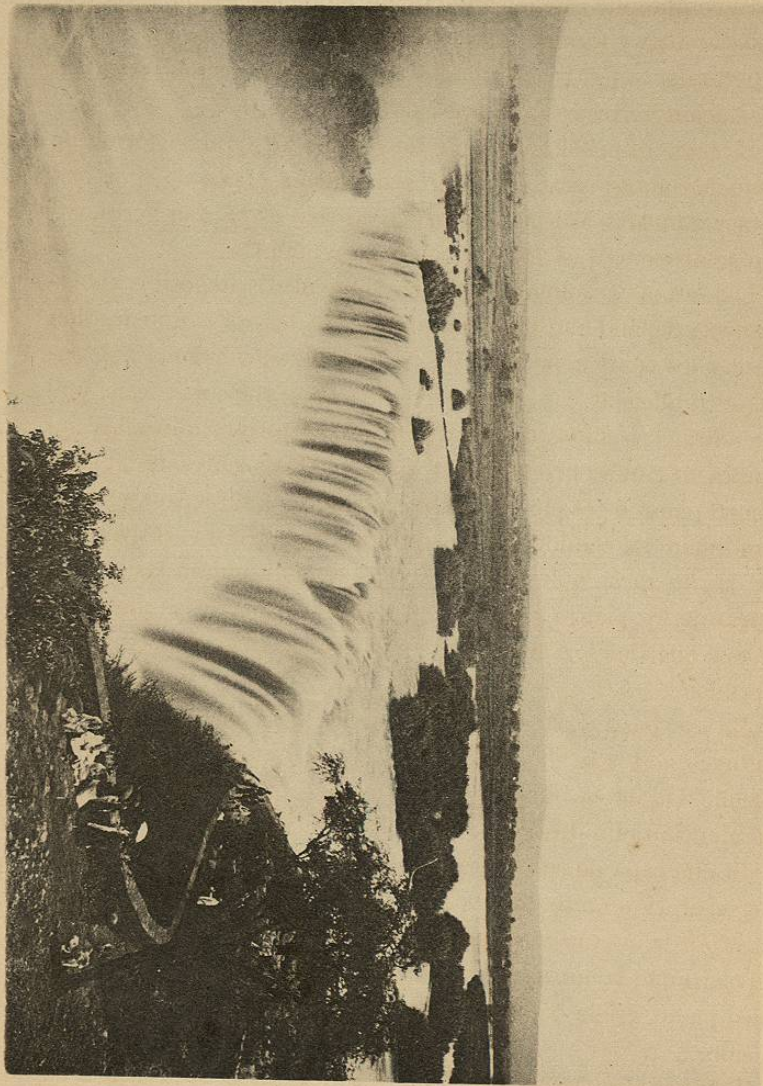


Photo. E. Bernard et Ce

SALTO DE JUANACATLAN
ESTADO DE JALISCO. — MÉXICO

Paris, 71, rue Lacondamine.

Aplicacion de
a Geología al
estudio de
aguas subte-
rráneas.

dad para el agricultor, y puede considerarse como una de las más importantes aplicaciones de la Geología á la agricultura.

Apoyado en sus vastos conocimientos geológicos y topográficos el célebre abad Paramelle, podia señalar con mucha seguridad sobre un mapa, el lugar donde debian encontrarse los manantiales ó aguas poco profundas en los terrenos correspondientes, causando admiracion la exactitud de sus determinaciones.

En las consideraciones que vamos á exponer tomarémos por guía la obra de aquel célebre hidrólogo, y citarémos ejemplos observados en el territorio mexicano.

Las aguas su-
perficiales in-
dicán las di-
recciones de
las interiores.

El estudio de las corrientes exteriores ó superficiales sirve de guía para el de las aguas subterráneas, y así deben observarse con toda atencion las líneas que aquellas siguen en su curso, así como las direcciones de los *thalwegs* principales y secundarios, para buscar el curso que siguen las corrientes bajo tierra, que en el mayor número de casos puede considerarse como la proyeccion de las primeras.

Regla Para-
melle.

Paramelle ha fundado la siguiente regla: Con pocas excepciones, *en cada valle, cañada, garganta, desfiladero ó pliegue de terreno existe un curso de agua aparente ó interior.* Para que el curso de agua visible pueda correr sobre el terreno, es necesario que le sostenga un terreno impermeable que le impida filtrarse: esta consideracion debe aplicarse á la corriente subterránea, y por esto hay necesidad de observar con cuidado la naturaleza de los terrenos que se estudian, si son aluviones, arenas, arcillas, etc., así como el estado de agregacion de sus partes constitutivas.

Datos para
buscar las
aguas subte-
rráneas.

Los datos principales en que debe fijarse un investigador al buscar los manantiales ó las corrientes poco profundas, son la naturaleza de las rocas, como se ha dicho, y las circunstancias topográficas del terreno.

Fijarse en la
naturaleza de
las rocas y en
su estrati-
grafia.

Respecto á lo primero se ha indicado ya lo necesario, repitiéndose aquí que deben observarse con el mayor cuidado las circunstancias estratigráficas de las rocas, determinando las direcciones, accidentes, etc., de los planos de estratificacion, de separacion, de ruptura, etc., cuyas circunstancias unidas á las de

la naturaleza de las rocas, darán el conocimiento relativo al poder de absorcion y sus circunstancias dependientes. En lo relativo á la configuracion topográfica, deben observarse las formas, inclinaciones y relaciones recíprocas de los accidentes exteriores.

Formas exte-
riores.

Para proceder en órden consideraremos primero las concavidades estrechas de terreno, pasando despues á las más amplias, hasta las llanuras. En una cañada angosta ó ancha puede existir un solo *thalweg*, ó un principal con sus secundarios ó afluentes. Si los *thalwegs* son iguales en su confluencia, debe existir el manantial ó corriente poco profunda, y si desiguales, en el más profundo, que será el receptor de las corrientes de los otros.

Consideracio-
nes sobre ca-
ñadas.

Si el terreno formare un circo, las corrientes subterráneas correrán como los radios de un semicírculo y el agua tendrá su menor profundidad en el centro del circo. El punto central de un circo está siempre al pié de la pendiente rápida y semicircular que le forman las paredes.

Caso de un
circo.

En los *thalwegs*, sea de cañada ó de valles, se observa que forman inflexiones al acercarse á recibir un *thalweg* afluente, y en esas inflexiones es en donde el agua se acopia y puede formar el manantial ó hallarse á poca profundidad: en las investigaciones deben atenderse muy cuidadosamente tales inflexiones.

Inflexiones de-
los *thalwegs*.

Partiendo del fondo de una cañada, ó pliegue de terreno, ó centro de un circo, el *thalweg* comienza á dibujarse, la pendiente del fondo de la cañada se suaviza, y la fuente que tiene ya un cierto volúmen, sigue siempre el *thalweg* del valle, sea que forme una línea casi recta ó aun tortuosa. Esta es otra regla establecida por el abad Paramelle, y agrega: así es como se forman y marchan las fuentes en el origen de todas las cañadas, tanto principales como secundarias.

Lugar en que
comienza el
thalweg en una
cañada, y ori-
gen del manan-
tial.

Al pié de un terreno escarpado, cuya base limita al plano del terreno, se encuentra generalmente un manantial. Esta regla la vemos confirmada en muchas localidades mexicanas. Las montañas acantiladas de pórfido forman barrancas ó circos, y en el terreno plano que está á su pié aparece el manantial, ó á corta distancia donde comienza á dibujarse el *thalweg*.

En los valles amplios habrá que atender á las direcciones ge-

Casos de los
valles amplios.

nerales de las pendientes y á sus relaciones con las montañas que los limitan. Cerca de ellas es en donde se ven con frecuencia los manantiales, así como á lo largo de los thalwegs, especialmente en las inflexiones, ó cerca de su desembocadura.

Causas que se
oponen á la ve-
rificación de
las reglas.

Estas son en general las reglas que deben seguirse para conocer los lugares donde pueden existir los manantiales, así como los puntos donde deben abrirse los pozos para encontrar las aguas subterráneas á menor profundidad y en más abundancia.

Se comprende que numerosas causas pueden influir para establecer excepciones á estas reglas, como son la naturaleza de las rocas, las relaciones de ellas, las formas y pendientes de las montañas, la existencia de accidentes subterráneos que desvían las corrientes, etc.; pero los conocimientos geológicos darán mucha luz en las investigaciones, para determinar las seguridades de encontrar las aguas ó las causas que formen las excepciones respecto á las discordancias que pueden existir entre las direcciones de los thalwegs superficial é interno. Paramele cita los tres casos siguientes:

Tres casos de
discordancia
en los thalwegs
superior é in-
terno.

1º Por la estratificación de los ribazos ó lados del valle.
2º Por las obras artificiales que hubieren desviado la dirección natural del thalweg. 3º Por la desviación que el ensanchamiento de las corrientes puede efectuar en las grandes avenidas.

La discordancia en el primer caso ocurre cuando las rocas que forman los dos lados del valle tienen su estratificación concordante y presentan inclinaciones diferentes: si se examina este caso, se verá que los planos de estratificación de la pendiente más suave van á quedar bajo los planos de la pendiente más fuerte, y la intersección superior que forma el thalweg visible, no puede coincidir con el thalweg subterráneo, y en este caso el curso de agua pasa al pié del lado más rápido. Esta causa explica por qué algunas veces no aparece un manantial en el medio de la desembocadura de la cañada que lo conduce, sino dislocado hácia uno de los lados ó al pié de algun acantilado.

Paso de co-
rrientes á un
valle inme-
diato.

Puede también acontecer que la corriente subterránea se pase á un valle inmediato abandonando el que la conduce, y este

caso puede suceder: 1º, cuando ambos valles están separados por una colina, cuyas rocas desagregadas ó porosas, ofrezcan mayor facilidad al paso de la corriente que la del conducto por donde circulaba: 2º cuando los planos de estratificación de la colina interpuesta han sufrido levantamientos ó hundimientos: 3º cuando esos planos se levantan á través del valle y forman un dique que se prolonga hasta el valle vecino.

El segundo caso de los enunciados, es decir, el que se refiere á trabajos artificiales, se comprende fácilmente, y deben observarse las causas de la desviación y buscar la dirección primordial del thalweg.

El tercer caso puede acontecer cuando las corrientes en sus avenidas salen de madre y forman atierres y hacen excavaciones que las obligan á seguir otro camino distinto del alineamiento natural del thalweg.

Hay pues necesidad de observar cuidadosamente los thalwegs para ver si siguen su dirección natural ó si han sido cambiados por las causas expresadas; y para descubrir si hay discordancia, se tienen que considerar las inclinaciones respectivas de las dos pendientes que forman el valle ó cañada, y determinar la línea de intersección que es el thalweg natural.

Sucede á veces que la dirección del thalweg subterráneo es marcada por la salida accidental de las aguas que conduce, cuando éstas no pueden estar todas ellas contenidas en el cauce ordinario. Muchas veces esa línea está señalada por la posición de ciertos pozos ó resumideros naturales, que en Francia se llaman *vetoires*, y por los cuales desaparecen con rapidez las aguas pluviales. Estos pozos son como lumbreras de las galerías subterráneas por donde circulan las aguas. Ejemplos de estos *vetoires* se ven en el llano de Chavarría cerca del Mineral del Doctor, en el Estado de Querétaro.

Modo de reco-
nocer la direc-
cion natural
del thalweg.

Expuesto lo anterior, debe comprenderse desde luego que si la situación del thalweg visible puede indicar la dirección del subterráneo, esto no exige que ambos sean en todos los casos paralelos y estén afectados de los mismos accidentes; por consiguiente hay que resolver los dos problemas relativos á escoger

Puntos en que
las corrientes
están á menor
profundidad.

Problemas relativos á la busca de aguas subterráneas.

los puntos en que las aguas subterráneas estén á menor profundidad y en donde deben ser más abundantes.

Cuatro casos del primer problema.

Respecto del primer problema, Paramelle indica los casos siguientes: las aguas tienen su menor profundidad: 1º en el punto central del primer pliegue del terreno donde se reúnen, sobre el plano elevado, todos los hilos de agua que forman el principio de la corriente subterránea; 2º el centro del circo donde comienza; 3º la parte baja de cada pendiente del thalweg visible; 4º las cercanías de su desembocadura.

Primer caso.

Examinando el primer caso, se deduce, que si una fuente subterránea tiene su origen en un plano elevado, el punto ménos profundo á que se encuentre debe ser aquel donde convergen y se reúnen los hilos de agua que la forman. Este punto está hácia el medio del pliegue de terreno en que comienza á aparecer el thalweg. Podríase practicar el pozo un poco hácia abajo sobre el thalweg donde se encontrará la corriente, y aun será más rica si otro pliegue del terreno llevase allí sus aguas, y será más profunda á causa de que las dos pendientes del terreno siendo ya más rápidas, llevarán las aguas pluviales sus escombros sobre aquel punto.

Segundo caso.

Al tratar del segundo caso se comprende con facilidad que en un terreno que tenga la figura de un circo el punto ménos profundo de sus aguas estará en el centro de figura, adonde convergen las corrientes parciales. Practicando la excavacion hácia abajo sobre el thalweg, se encontrará la corriente, aunque á mayor profundidad.

Tercer caso.

En el tercer caso se recomienda hacer la perforacion en la parte baja de las pendientes del thalweg visible, porque allí se encontrará el agua á ménos profundidad, sobre todo en el caso de que un dique ó banco de roca más dura atraviese una cañada, pues en este caso habrá un depósito grueso de terreno detrítico hácia la parte alta, que habria necesidad de perforar hasta ponerse á nivel del otro lado del dique. El hecho tan frecuente de que los ojos de agua aparezcan al pié de las pendientes, viene á confirmar esa regla.

Los hechos que se presentan contrarios al caso de que nos

ocupamos son muy raros, y debido principalmente á la posición de rocas impermeables que detienen el descenso de la corriente y la obligan á abrirse paso sobre la pendiente del terreno.

Excepciones del tercer caso.

El cuarto caso se refiere á las desembocaduras de las cañadas á un thalweg, ó corriente permanente, porque es el lugar de término de las corrientes superiores é inferiores, y se puede hacer la perforacion un poco arriba de la desembocadura, siempre que la pendiente del fondo de la cañada sea suave.

Cuarto caso.

Por esto se ve que se practican pozos cerca de los lechos de las corrientes, y el agua que allí se descubre es de la que conduce el thalweg que va á desembocar en el principal.

A veces se sirven los investigadores de la presencia de ciertas plantas, para conocer que el agua subterránea no se encuentra á grande profundidad. En estas observaciones debe tenerse en cuenta que algunas de estas plantas se conforman con sólo la existencia de la tierra húmeda, sin que exista corriente á poca profundidad. La situacion natural de ciertas plantas en los thalwegs, en los circos, en la parte baja de las pendientes, sí puede ser un indicio más probable, y esto concuerda con las reglas que acaban de darse.

Plantas que caracterizan la tierra húmeda y las que señalan las aguas subterráneas.

En México, especialmente en las tierras calientes, indican las tierras húmedas los musgos, las hepáticas los helechos y las begonias, especialmente en los paredones y acantilados de las cañadas y arroyos.

Las plantas que generalmente se hallan sobre los thalwes que conducen el agua á poca profundidad, son en las tierras elevadas los sabinos ó ahuehuetes (*Taxodium disticha*), y los sauces y jarales ó jarillas de flor blanca. En las tierras calientes son más comunes los carrizos (*Arundo*), sauz (*Salix*), Higuera, Camichin, Zalate, Amate (diversas especies de *Ficus*); una bignonia arborescente llamada impropriadamente sabino (*Bignonia bimalis*); el jaral amarillo (*Litrum flavum*), que no debe confundirse con el *Senecio vernus*, que crece en diversos terrenos; varias aroídeas como las llamadas colomos, mafafas y otras.

En el Valle de México se ven los sabinos en los ojos de agua y sus cercanías, como se nota en Chapultepec, en Santa Fe y en

otros lugares en donde mana el agua. En otras localidades aparecen esos árboles marcando desde léjos el curso de los rios y arroyos, sean permanentes ó temporales. Esta misma observacion puede hacerse de las *higueras* y *sauces* en las tierras calientes, y con frecuencia se ve el manantial al pié mismo de los árboles.

Determinacion de los puntos donde se encuentra el agua en mayor cantidad.

Viene ahora el segundo problema, el relativo á determinar los puntos en que las aguas subterráneas se encuentran en mayor cantidad. Al tratar este asunto debe considerarse que una corriente va aumentando el caudal de sus aguas con los afluentes que recibe, desde su origen hasta el punto de desembocadura; pero hay que tomar en cuenta los casos que pueden presentarse al paso de la corriente por las rocas permeables é impermeables, pues en el primer caso las aguas pueden concentrarse, y en el segundo extenderse, sobre todo al entrar en los terrenos de acarreo.

Debe elegirse el pié de una pendiente.

Por estas consideraciones se comprende que al pié de una pendiente, donde el agua tiene la menor profundidad, debe tener tambien mayor cantidad, porque al atravesar los bancos de roca compacta de una pendiente, camina generalmente por un solo conducto, y al entrar en el terreno del plano encuentra por lo regular las capas de acarreo ménos comprimidas, donde la corriente se ensancha.

A lo largo del thalweg.

Cuando por alguna circunstancia no puede practicarse la excavacion precisamente en el lugar recomendado, se hará á lo largo del thalweg, procurando, en cuanto sea posible, acercarse al pié del descenso como se dijo.

Corrientes extendidas.

En algunos terrenos planos las aguas subterráneas se hallan extendidas en capas extensas, y en donde quiera que se perfore se puede encontrar el agua.

Circunstancias necesarias para que las aguas se extiendan.

Para que los terrenos presenten estas circunstancias es necesario, segun Paramelle, que reciban de las cañadas relacionadas á ellos, una ó muchas corrientes considerables; que el terreno esté formado hasta cierta profundidad de gujarros, matatenas y arena, que permitan al agua extenderse con libertad; que exista bajo el terreno flojo una capa impermeable, paralela á la superficie y de una grande extension.

Como estas circunstancias pueden repetirse á la profundidad, se comprende que pueden existir dos ó más capas que se pueden aprovechar en una perforacion, y generalmente acontece que así se obtenga mayor cantidad de agua. Tambien puede suceder que las corrientes formen mallas ó arroyos bajo las capas terrestres, y en este caso se pueden obtener resultados muy diferentes en perforaciones que se practiquen á cortas distancias: este caso se presentará cuando no se extiendan regularmente las capas permeables y las impermeables ó que sus materiales no estén colocados uniformemente.

Series de capas de aguas subterráneas.

Division en mallas y arroyos.

Ejemplos de la extension general de las capas de agua y de la subdivision en arroyos, encontramos en el Valle de México y en otras localidades del país.

Ejemplos de estos casos en el Valle de México.

El Valle de México, de que ántes se hizo mencion, es un valle cerrado y circundado por montañas que tienen cañadas de diversas profundidades; debajo circulan las aguas subterráneas que en algunos puntos aparecen á la superficie formando manantiales, á veces de consideracion, como los que se aprovechan para el surtimiento del agua en la capital; otra parte de esas aguas se extienden en diversas capas paralelas, que en las perforaciones artesianas se van cortando, porque existe esa serie de capas permeables é impermeables, colocadas unas sobre otras. Las aguas subterráneas se encuentran en este Valle á muy poca profundidad de la superficie del suelo, y extendidas uniformemente. Las capas brotantes presentan en algunos puntos de la ciudad y fuera de ella, el caso de distribucion irregular de que se ha hecho mencion. En las manzanas que comprenden las calles de Santo Domingo se ha dado el hecho de que en una casa se ha practicado uno pozo artesiano á corta profundidad, y en otra vecina ha habido necesidad de hacer una excavacion profunda para encontrar una regular cantidad de agua. En las poblaciones se presenta con frecuencia el caso de que en unos barrios el agua de los pozos es buena, y en otros no se puede utilizar para los usos domésticos. Este hecho es muy notable en la ciudad de Guadalajara, y en algunos barrios alternan las casas donde hay pozos de agua potable y de agua mala.