UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

Estudio Fotohidrogeológico de la Cuenca Alta del Rio Lerma, Estado de México

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOLOGO
PRESENTA

ABEL CRESCENCIO GUTIERREZ GONZALEZ

México, D. F.
1967

TGg0222

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MIS PADRES

Con imperecedera devoción y como un tributo a su recuerdo.

A MIS HERMANOS

Como una recompensa a su noble esfuerzo y una realidad a sus sueños.

A MIS SOBRINOS

AL SR. LIC. EDMUNDO URBIOLA OLVERA

A LA MEMORIA DE MI MADRINA
SRA. CATALINA AGUILAR DE PIÑA.

A MI ESCUELA

A MIS MAESTROS LOS SEÑORES INGENIEROS

Benjamín Márquez
Heinz Lesser Jones
Rodolfo del Arenal
Alejandro Calderón
Armando Quezadas
Fernando Ríos McBeath
Felipe Guerra Peña
Alejandro Guzmán Aguirre
Lorenzo Torres Izábal
Armando Reyes Lagos
Ulrich Hungsberg

A MI PADRINO DE GENERACION

Ing. Carlos Castillo Tejero

AGRADECIMIENTOS

EL AUTOR AGRADECE AL DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL Y A LA CIA. SERVICIOS GEOLOGICOS, S.A., LAS - FACILIDADES QUE LE BRINDARON PARA LA ELABORACION DEL PRESENTE ESTUDIO.

A los Sres. Ings. Arturo Carranza Edwards, Rubén Martínez Guerra, Rafael Rodríguez Torres y Eduardo Aguayo Camargo, por su valiosa cooperación.

Al Ing. Ignacio Sáinz Ortíz, por sus orientaciones y consejos para el desarrollo de esta Tesis.

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-4317
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

Al Pasante señor Abel Crescencio GUTIERREZ GONZALEZ
P r e s e n t e

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el señor profesor Ingeniero Heins Lesser - Jones, para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero GEOLOGO.

EESTUDIO FOTOHIDROGEOLOGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO LERMA, ESTADO DE MEXICO.

I.- INTRODUCCION

II.- GENERALIDADES

a) Antecedentes
b) Localización del área
c) Vías de Comunicación

III.- FOTOHIDROGEOLOGIA

a) Definición
b) Método de trabajo
c) Criterios de fotointerpretación
d) Reconocimientos de campo

IV.- FISIOGRAFIA

a) Provincia Fisiográfica
b) Clima y Vegetación
c) Orografía
d) Hidrografía

V.- GEOLOGIA

a) Geomorfología
b) Estratigrafía
c) Tectónica
d) Geología Histórica

VI.- HIDROGEOLOGIA

a) Criterios para determinar las características hidrogeológicas de las unidades identificadas.

##

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-4317
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

b) Características de las unidades litológicas identificadas.
c) Funcionamiento cualitativo de los acuiferos en la Cuenca.

VII.- SECUELA DE ESTUDIO PARA LA EVALUACION DE LAS - GUAS SUBTERRANEAS EN UNA CUENCA.

VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, - deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de - Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., a 9 de junio de 1967
EL DIRECTOR

Ing. ~~Manuel Paulín Ortiz~~

MPO/MMO/rr.

CONTENIDO

	PAGINA No.
I.- INTRODUCCION	1
Objeto del estudio	5
II.- GENERALIDADES	6
a.- Antecedentes	6
b.- Localización del área	7
c.- Vías de comunicación	7
III.- FOTOHIDROGEOLOGIA	9
a.- Definición	9
b.- Método de trabajo	11
1a. Etapa	12
2a. Etapa	14
3a. Etapa	14
c.- Criterios de interpretación	15
Características del drenaje	16
Cubierta superficial	18
Variación de tonos	19
Presencia de Manantiales	19
Vegetación y agricultura	20
Presencia de presas	20
Fisiografía	20
d.- Reconocimiento de campo	20
1.- Sección Toluca	21
Zona Oriental	21
Zona Occidental	24

PAGINA No.

II.- Sección Perales 25

Zona Oriental 25
Zona Occidental 26

III.- Sección Atlacomulco 27

Zona Oriental 27
Zona Occidental 28

IV.- FISIOGRAFIA 31

a.- Provincia Fisiográfica 31
b.- Clima y vegetación 33
c.- Orografía 35
d.- Hidrografía 38

V.- GEOLOGIA 40

a.- Geomorfología 40
b.- Estratigrafía 52

Unidades del Terciario 53
Unidades del Cuaternario 57

c.- Tectónica 61
d.- Geología Histórica 65

VI.- HIDROGEOLOGIA 68

a.- Criterios para determinar las características - hidrogeológicas de las unidades identificadas. 68

A).- Criterios Fotohidrogeológicos 68
B).- Reconocimientos de campo 69

b.- Características hidrogeológicas de las unidades identificadas. 69

PAGINA No.

c.- Funcionamiento cualitativo de los acuíferos en la cuenca. 71

Valle de Toluca 71
Estrechamiento de Perales 73
Valle de Ixtlahuaca 73

VII.- SECUELA DE ESTUDIO PARA LA EVALUACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN UNA CUENCA. 75

a.- Hidrogeología 76
b.- Información básica indispensable para la cuantificación. 76

Información que permita conocer la hidrología - superficial. 76

Información específica que permita conocer la - hidrología subterránea. 77

c.- Cálculo de los recursos de agua subterránea 80

Primera Etapa 80
Segunda Etapa 83
Tercera Etapa 85

VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 88

Conclusiones 88
Recomendaciones 89

BIBLIOGRAFIA 91

ANEXO PLANO FOTOHIDROGEOLOGICO.

I. INTRODUCCION

La evolución de todas las ramas del saber humano, iniciada a partir de la Segunda Guerra Mundial, que presenciamos en la actualidad, tiene la finalidad de darle al hombre, mayores y mejores satisfactores; siendo el agua el más importante de ellos, la ciencia encargada del estudio de su localización, movimiento y cuantificación (en el subsuelo), así como de los medios necesarios para ponerla al servicio de la comunidad, ha sufrido modificaciones tendientes a mejorar sus procedimientos geológicos y analíticos, para poder satisfacer la demanda cada vez más creciente de una población mundial en constante aumento y desarrollo.

En nuestro medio, se ha designado con el término de Geohidrología, al estudio general del agua subterránea, sin embargo, debido a los adelantos mencionados en el párrafo anterior, encaminados a una mayor veracidad en los estudios de esta índole, se hace necesaria una distinción, entre los aspectos geológicos y los hidráulicos ó analíticos. En otras partes del mundo, por ejemplo: E.U.A., Europa y algunos países Sudamericanos, se han usado los términos HIDROGEOLOGIA Y GEOHIDROLOGIA, para cubrir esos aspectos respectivamente; pero no se les ha tratado de un modo correcto, al ser usados, indistintamente, por diversos autores para designar el mismo concepto, creando con ello una confusión en su acepción.

En nuestro país empiezan a ser aceptados y usados por los profesionales en la materia, como dos conceptos muy diferentes.

Una discusión sobre el uso apropiado de cualesquiera de estos términos, empezará basándose en su significado literal, pero debido a que ambos están formados por las mismas raíces, el problema no se aclara hasta tomar en cuenta lo siguiente: "El lenguaje debe ser una expresión para denominar un concepto y nunca éste será una justificación de aquél", tal como lo expresa la antigua máxima "De nomine non set quaestio". Ahora - bien si en Hidrogeología, HIDRO es el prefijo que modifica el sentido del sustantivo GEOLOGIA, haciendo que ésta tenga énfasis en el aspecto - Hidrológico y en Geohidrología se procede en forma similar, la cuestión se disipa; teniendo la ventaja de expresarse con un sustantivo y una raíz y no con tres raíces, lo que hace menos engorrosa la percepción del significado de alguno de esos conceptos. Por otro lado, al considerar el carácter técnico de estos términos y su empleo en otros países, el autor estima conveniente el análisis más a fondo del problema, por personas autorizadas y - recomienda su uso, en base a lo ya expresado y en la forma antes señalada.

De lo anterior podemos concluir que, un estudio para cuantificar los recursos de agua subterránea en una zona, se puede dividir en dos grandes etapas, quedando incluída en cada una de ellas la recopilación y análisis de la información existente para el desarrollo de la misma. En la pri-

mera parte, se estudiarán las características físicas del área, ayudándose - con sus planos geológicos y topográficos, para hacer un estudio geológico superficial enfatizado hacia las propiedades de tener agua de los diferentes materiales aflorantes, ésto es, la Hidrogeología del área en cuestión. La segunda parte, corresponderá a la Geohidrología y comprenderá la cuantificación de los recursos, siendo necesario tener un conocimiento real de las explotaciones y su régimen de extracción, de las variaciones en los - almacenamientos de los diferentes acuíferos, la cantidad de recarga, etc., todo ello, para poder establecer el equilibrio dinámico de los acuíferos - estudiados y así, calcular el volumen máximo de extracción perenne; para ello, dependiendo del grado de aproximación que se requiera y desde luego de la calidad de los datos disponibles, se puede recurrir a cualquiera de los métodos siguientes:

-Por coeficientes empíricos de infiltración en los diferentes - materiales que afloran en la zona estudiada.

-Por el método del déficit de escurrimiento, mediante la aplicación de la ecuación del balance hidrológico.

-Por el análisis de las curvas de decaimiento de caudales, en las corrientes superficiales y manantiales.

Es pertinente hacer la aclaración, que dentro del estudio hidrogeológico de una zona, para algunos autores, se debe incluir el análisis -

químico de las aguas subterráneas y debe hacerse una cuantificación tosca, sugiriendo para ello el empleo del método de coeficientes empíricos de infiltración.

En este capítulo, el autor expone el problema de nomenclatura que existe en la "Geohidrología" y sugiere la forma de solucionarlo, mediante los conceptos: Hidrogeología y Geohidrología, para explicar las bases, por las que ha llamado a este trabajo estudio Fotohidrogeológico, así mismo, para poder usar durante su desarrollo, alguno de estos vocablos sin necesidad de definirlo.

La importancia de los estudios Fotohidrogeológicos es que se estudia una cuenca, para tener un conocimiento comprensivo de sus características y limitaciones geológicas, que afecten y modifiquen las condiciones hidrológicas del área.

En el presente estudio, la Fotogeología tradicional sufre una variación, aún cuando todos sus principios básicos son empleados; en esta variación, la litología de la zona no es diferenciada en unidades litoestratigráficas, sino por diferencias litológicas y tomando en cuenta propiedades tales como porosidad y permeabilidad, distinguiendo las zonas de recarga, acuíferas, impermeables, etc., para poder conocer el funcionamiento Hidrogeológico de la cuenca.

El objeto de este trabajo es:

1.- Presentar un estudio Hidrogeológico basado en fotografías aéreas, su secuela de trabajo y las conclusiones y recomendaciones.

2.- Señalar la necesidad de adoptar una terminología más clara y precisa, ajustándose a los adelantos que en la materia se operan.

3.- Dar una idea general de los estudios Geohidrológicos actuales mediante una secuela de trabajo que se expone.

II. GENERALIDADES

a.- ANTECEDENTES

La cuenca estudiada se puede considerar como vírgen desde un punto de vista geológico puro, debido a que solo ha sido analizada en forma parcial ó total por 4 trabajos, todos ellos de tipo particular, orientados a la cuantificación de sus recursos de agua subterránea, para el abastecimiento de la ciudad de Toluca, ó de la ciudad de México. Estos trabajos, a continuación se enumeran en orden cronológico:

"Plan que se propone para incrementar el abastecimiento de la ciudad de México por medio del sistema Lerma", por el Dr. A. Loehnberg, enero de 1959.

"Estudio Geohidrológico para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Toluca, Méx.", por el Ing. Mario Veytia Barba, septiembre de 1960.

"Estudio Geohidrológico de la parte Alta del Río Lerma", por el Ing. Mario Veytia Barba, diciembre de 1960.

"Estudio Geohidrológico de la Cuenca Alta del Río Lerma, hasta el Estrechamiento de Atlacomulco", por la Cía. Servicios Geológicos, S.A., diciembre de 1966.

b.- LOCALIZACION DEL AREA

La zona en estudio corresponde a la Cuenca Hidrográfica Alta del Río Lerma, hasta el Estrechamiento de Atlacomulco; queda localizada hacia el Oeste del Edo. de México, estando su parte Noroeste dentro del Edo. de Michoacán; está limitada aproximadamente por los paralelos 19°10' y 19°45' de latitud Norte y los meridianos 99°32' y 100°05' de longitud - Oeste del meridiano de Greenwich, su extensión aproximada es de - - 4,500 km^2 (ver plano anexo).

c.- VIAS DE COMUNICACION

Dado que dentro de la zona en estudio se localiza la ciudad de Toluca, Capital del Edo. de México, las principales vías de comunicación convergen a ella, dando por resultado que su distribución no sea uniforme. La parte comprendida desde el Estrechamiento de Perales por el Norte y los límites hidrográficos de la Cuenca por el Sur, Este y Oeste, es la mejor - comunicada, siendo deficiente al Norte del mismo Estrechamiento y pobre en la zona Noroeste de la cuenca.

Las carreteras de mayor importancia son las siguientes:

Carretera Federal No. 15; México-Toluca, continuándose al - Oeste, hacia la ciudad de Morelia.

Carretera Federal No. 130; Naucalpan, Méx.- Toluca.

Partiendo desde la ciudad de Toluca, tenemos las siguientes:

Toluca-Valle de Bravo, Toluca-Temascaltepec, Toluca-Ixtapan de la Sal y por último Toluca-Palmillas, teniendo ésta una dirección sensiblemente Norte-Sur en la cuenca. Esta última es la de mayor importancia de la zona Norte, comunicando a la ciudad de Toluca con las poblaciones de Ixtlahuaca y Atlacomulco.

Además, cuenta con caminos vecinales de terracería y de herradura.

El ferrocarril México-Toluca-Morelia; que dentro de la cuenca pasa por los poblados de Salazar, Lerma, Santa Rosa, Santa Ana, Toluca, Santa Cruz e Ixtlahuaca.

III. FOTOHIDROGEOLOGIA

a.- DEFINICION

Entre los métodos geológicos de prospección superficial el estudio e interpretación de fotografías aéreas, complementadas con reconocimientos de campo, es uno de los más novedosos y al mismo tiempo con más futuro, por sus aplicaciones tan variadas y ventajas tales como bajo costo por kilómetro cuadrado y menor tiempo en su ejecución, amén de otras no menos importantes.

Dentro de las técnicas de interpretación de fotografías aéreas, la Fotohidrogeología es una de sus ramas más recientes, teniendo aplicación en el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Se puede definir a la Fotohidrogeología, como el análisis e interpretación de fotografías aéreas estereoscópicamente, con el objeto de obtener información Hidrogeológica, mediante la cual es posible deducir la dirección del flujo subterráneo, sus barreras naturales y la asociación hidrogeológica con las zonas colindantes.

Esto dá como resultado un plano, que no necesariamente corresponde al geológico convencional de la misma zona, pero en ése aparecen los principales fenómenos geológicos, que han actuado y originado el estado actual del área en cuestión.

La diferencia entre ambos planos, es la forma de agrupar las diferentes unidades litológicas, ya que en uno geológico es por medio de

formaciones caracterizadas por una litología, mientras que en un Hidrogeológico es tomando en cuenta la naturaleza de las diferentes rocas aflorantes, pero principalmente por sus propiedades con relacion al agua; así, tenemos que litologías como el granito, el gneiss, el gabro, la diorita, etc., que normalmente en un plano geológico corresponden a formaciones diferentes, en un Hidrogeológico, se pueden considerar como una sola unidad. Por otro - lado, el caso contrario también existe, ya que depósitos de aluvión como gravas, arenas y arcillas que en geología son considerados como una formación, para fines Hidrogeológicos son separados y agrupados considerando sus diferentes propiedades Hidrogeológicas.

Para la realización de un estudio Fotohidrogeológico, el Geólogo además de emplear criterios de fotointerpretación, se apoya en otras ramas de la Geología, siendo las principales las siguientes: Geomorfología, Estratigrafía, Petrografía y Geología Estructural; y en algunos casos, al tratarse de rocas sedimentarias, se auxiliará con algunos métodos paleontológicos.

Geomorfología.- Para estudios geológicos basados en fotografías aéreas, sea cual fuere su aplicación, tiene gran importancia, debido que un tipo de roca en un ambiente determinado tiene una manera peculiar en el desarrollo de su morfología. De lo anterior es posible, tomando en cuenta las formas terrestres, deducir el tipo de material que las componen; su estratigrafía y tectónica regional.

Estratigrafía.- Es esencial en estudios que se llevan a cabo en zonas de rocas sedimentarias y volcánicas, debido a que el conocimiento de la secuencia, espesor y continuidad de los estratos acuíferos en la cuenca, permite conocer los confinamientos y la dirección del flujo subterráneo.

Petrografía.- Su aplicación es suficiente desde un punto de vista megascópico y su importancia reside en que un tipo de roca en un medio - ambiente, tiene porosidad y permeabilidad distintivas, pudiéndose obtener mediante su aplicación, la idea general sobre la relación agua-roca, que es la base en la formación de las unidades hidrogeológicas.

Geología Estructural.- Su aplicación es complementaria de la estratigrafía, para conocer la posición de los estratos acuíferos, que hayan sufrido un desplazamiento ó dislocación, en el transcurso de la historia geológica de la zona estudiada.

b.- METODO DE TRABAJO

En la realización del presente estudio, la secuela de trabajo - consistió de tres etapas y cada una de ellas, a su vez, comprendió diferentes pasos. La primera y tercera, fueron esencialmente de fotointerpretación y gabinete, en la primera, se hizo una interpretación preliminar de la zona, y en la tercera, se interpretó la cuenca en su totalidad en forma definitiva y se elaboró el plano Fotohidrogeológico que se presenta, mientras que la -

segunda etapa, comprende los reconocimientos de comprobación de campo; esta última, será expuesta con mayor detalle, en un inciso posterior de - este capítulo, con el objeto de que el método de trabajo quede en forma - contínua.

La secuela seguida fué la siguiente: 1a. ETAPA

1.- Recopilación de toda la información existente de la cuenca, tanto de los estudios realizados con anterioridad (Capítulo II, inciso a) como del plano fotogeológico existente, que fué interpretado por el Ing. F. Mooser, para la Comisión Lerma-Chapala-Santiago, siendo su escala - - 1:100,000.

2.- Estudio general de los mosaicos y fotografías aéreas, con el objeto de tener una idea general de la geología de la zona, así como de los rasgos geológicos importantes. (Las fotografías fueron tomadas, en vuelos realizados por la Cía. Mexicana Aerofoto, S.A., en el año de 1956, empleándose 506 fotografías verticales de contacto, con una escala aprox. - de 1:50,000; y 41 mosaicos de contacto, de escala aprox. 1:25,000).

3.- Estudio preliminar estereoscópico, para elegir tres secciones que fuesen interesantes y representativas de la cuenca, estas secciones tienen una dirección general E-W y su ancho aproximado es de 30 km, estando localizadas de la siguiente forma:

I.- Sección Toluca.- Esta Sección empieza en el parteaguas Oriental, a la altura del Kilómetro 36 de la carretera Federal No. 15, México-Toluca, en la Estación de Salazar, continúa con rumbo E-W paralela a dicha carretera, pasa por la población de Lerma hasta la ciudad de Toluca y continúa por la carretera Toluca-Valle de Bravo, para terminar en el parteaguas Occidental de la cuenca, quedando comprendida dentro de ella la porción NW del Nevado de Toluca.

II.- Sección Perales.- Esta Sección toma su nombre del Estrechamiento Fisiográfico de Perales, el cual queda comprendido en su totalidad dentro de sus límites, empieza desde el Oriente en la Sierra de Las Cruces, siguiendo el rumbo ya indicado, cruza el Río Lerma transversalmente a su dirección de escurrimiento, pasando por la población de Ixtlahuaca, para terminar en el parteaguas Occidental de la Cuenca, en el Cerro de La Campana.

III.- Sección Atlacomulco.- Empieza desde el parteaguas Oriental, cruza el Cerro de Jocotitlán, comprendiendo las poblaciones de Atlacomulco, San Felipe del Progreso y Carmona, hasta el límite Hidrográfico Occidental.

4.- Ya seleccionadas las tres secciones, fueron estudiadas e interpretadas en forma detallada, con un estereoscopio de la marca "Wild",

interpretando y delimitando la hidrografía de la zona, las áreas de nivel - freático somero, los contactos entre las diferentes unidades y su tectónica, y rasgos culturales como caminos, ferrocarril, etc.

5.- La interpretación de las fotografías aéreas, fué pasada a - los mosaicos correspondientes, para hacer los reconocimientos de campo de comprobación.

2a. ETAPA

1.- Reconocimientos de comprobación de campo, para ello se emplearon todas las vías de comunicación que más se acercaban a los aflo- ramientos por ratificar, esos itinerarios fueron planeados desde el gabinete, con la ayuda de las fotografías aéreas, para cubrir de un modo más acucio- so las diferentes secciones.

3a. ETAPA

1.- Una vez terminados los reconocimientos de campo, compro- bada y corregida la interpretación de las diferentes secciones, fueron usa- dos como analogías los criterios de interpretación ya corregidos para el estu- dio de las zonas que faltaban, teniendo de esta forma la cuenca estudiada - en su totalidad.

2.- La interpretación definitiva de la cuenca se pasó a los mosai

cos respectivos y se elaboró el plano Fotohidrogeológico. Para ello, se - calcó el drenaje de los mosaicos, reduciendo esa calca de esc. 1:50,000 a 1:100,000, para así tener un plano base de la cuenca, sobre el cual se vació la geología, por medio de un proyector y un copiador virtual (Sketch-master).

c.- CRITERIOS DE INTERPRETACION

El estudio de las aguas subterráneas, es un problema compuesto que requiere la investigación de las características geológicas y las condiciones de drenaje, tanto superficial como subterráneo.

La interpretación Fotohidrogeológica, comienza por valorar las propiedades de aquellas unidades, que por medio de las fotografías aéreas pueden reconocerse.

Para esta interpretación los principales criterios Fotogeológicos empleados se basan en el análisis de los rasgos que a continuación se exponen, los cuales considerados separadamente, pueden no ser suficientes para obtener una descripción y conocimiento de las actitudes de la litología - con respecto al agua, pero su asociación al igual que en otras especialidades Fotogeológicas, dan una base real para conocerlas y diferenciarlas.

1o.- El rasgo observado es el drenaje y la erosión fluvial, factores intrínsicos que son interdependientes. El agua de lluvia, se evapora, penetra dentro de un terreno poroso ó corre sobre la superficie de rocas -

impermeables, según el gradiente topográfico general del terreno, siendo - ésto lo que desarrolla el patrón del drenaje superficial que es un conjunto de canales ramificados como cañadas, arrollos, corrientes tributarias y principales. Este patrón tiene variaciones de forma, textura, densidad y tipo, dependiendo principalmente de la litología, ésto es, que la roca sea resistente ó suave, porosa y permeable o impermeable, soluble ó insoluble, que esté consolidada ó bien sin consolidad; el otro factor determinante es el tectonismo que la haya afectado.

El principio, de que un patrón depende del tipo y tectónica de una roca, conduce a la conclusión que las características comunes como son: la forma, tipo de configuración, textura, densidad, homogeneidad y grado de integración, indican materiales similares ó igual tipo de roca, así como condiciones tectónicas semejantes. El Fotohidrogeólogo separa y delimita - las áreas de características comunes, con el objeto de obtener conclusiones sobre el tipo de roca. Las características del drenaje observadas son:

1.- La forma se refiere al análisis individual del drenaje, que según W.D. Thornbury son los siguientes tipos: recto, curvo, retorcido, - sinuoso o serpenteante, anastomosado, rectangular, trenzado, deltaico ó distributario.

2.- La configuración del drenaje, es el patrón ó diseño particular que forman colectivamente los cursos individuales de agua, W.D. Thorn-

bury. Posteriormente en 1959 D.R. Lueder en su libro Aerial Photographic Interpretation, dice: la forma de la configuración del drenaje puede indicar el orígen y tipo de la roca que subyace en un área dada, bajo los detritos transportados ó el suelo residual. Por otra parte, ciertas rocas tienen típicas configuraciones del drenaje que las lava, a causa de las características físicas, erosionales y formacionales, de las rocas mismas.

La permeabilidad sea cual fuere su orígen, en un ambiente dado y en condiciones tectónicas semejantes forma parte de las características físicas de la roca y su influencia en el drenaje es obvia.

3.- Textura del drenaje.- Definida por W.D. Thonbury como "relaciones espaciales"; al respecto H.F. von Bandt (1962) dice: Una configuración estrechamente espaciada, se localizará em rocas impermeables, blandas ó quebradizas, como arcilla, lutitas, "loess", pizarras y esquistos frágiles.

Según O.D. von Engeln (1949), dependerá, en parte, en las corrientes consecuentes, de la disposición de las irregularidades del relieve inicial y de la permeabilidad de los materiales superficiales. Si éstos son muy permeables, gran parte de la precipitación total seguirá un curso subterráneo por alguna distancia.

4.- Densidad del drenaje.- La definen R.G. Ray y W.M. Fisher

(1960), como la longitud total de las corrientes fluviales dentro de un área, dividida por el área.

Los mismos autores dicen: resulta claro que la permeabilidad ejerce una influencia fundamental sobre la densidad del drenaje, con alta permeabilidad se produce una baja densidad.

5.- Homogeneidad ó uniformidad del drenaje.- La homogeneidad exhibida por una configuración del drenaje en un área dada, corresponde a la uniformidad en las condiciones principalmente litológicas, predominantes en dicha área; Felipe Guerra Peña (1962).

6.- Grado de Integración.- Es la continuidad hidrográfica en una zona, donde juega un papel importante la permeabilidad de la roca, así tenemos que en basaltos, su red hidrográfica está mal integrada, mientras que en una roca impermeable, por ejemplo una andesita, su configuración estará bien integrada, (suponiendo que aun fracturada, sus huecos ó cavidades no están comunicados).

2o.- La cubierta superficial, que pueda impedir la infiltración, un suelo arcilloso será un obstáculo para que el agua penetre a las rocas porosas.

En este trabajo, el suelo que por su influencia tiene más importancia es el suelo residual formado por las andesitas antiguas que constituye una barrera que impide el flujo percolante del agua de lluvia.

3o.- En las fotografías aéreas las variaciones de color de los objetos terrestres son transladados a tonos diferentes que varían del blanco puro al negro oscuro y todos los tonos de gris que entre ellos hay. Esta tonalidad gris es un detalle importante, indicativo y selectivo de mucha ayuda en la separación y delineación de los materiales rocosos. La tonalidad es siempre relativa por depender de características técnicas de exposición, luz, reflexión de la superficie, color de la roca ó vegetación y de la película empleada (pancromática).

La interpretación de las variaciones de tono en relación con el carácter litológico de la roca, es limitada y no debe ser evaluada sin control de campo ó en algunos casos en que los detalles morfológicos, drenaje, cañadas, resistencia erosiva, correspondan con la tonalidad de una roca tipo.

Hay algunos tonos que son característicos como por ejemplo, el agua estancada, zonas de evaporación, nieve, agua profunda, la humedad, etc.

La aplicación de este criterio, como ya se mencionó, no es absoluta y su aplicación se relaciona con la diferenciación de materiales rocosos y su correlación.

4o.- Como el indicativo más claro sobre las propiedades de la roca, está la presencia de manantiales, siendo fácilmente observables y

reconocibles en las fotografías aéreas, dado que una corriente se inicia en un lugar sin tener relación con el drenaje superficial, se pueden reconocer también por la vegetación que se concentra alrededor de ellos.

5o.- La vegetación y agricultura, según su tipo son indicadores cualitativos de la presencia de agua subterránea, pero sobre todo de las - características del material superficial.

6o.- Un rasgo que si bien no es de naturaleza física sino humana y que denota claramente la capacidad de infiltración de las diferentes unidades litológicas, es la presencia de bordos y presas.

7o.- Un criterio que si bien no proporciona un indicio sobre la permeabilidad de las diferentes rocas, sí en cambio nos dá una guía para - distinguirlas y agruparlas en forma preliminar, es el fisiográfico, en cuanto a la relación que guarda con todos y cada uno de los constituyentes líticos.

Debe hacerse hincapié que todos estos criterios en su conjunto y sólo aplicados así, son los que nos pueden manifestar las condiciones - del terreno y que los reconocimientos de campo no solo son complementarios sino fundamentales para la determinación de las diferentes unidades - Hidrogeológicas.

d.- RECONOCIMIENTOS DE CAMPO

Los reconocimientos de campo que se han agrupado dentro de la 2a. etapa en el método de trabajo, fueron planeados por medio de las -

fotografías aéreas, como una más de sus aplicaciones. Para su realización se utilizaron las carreteras federales y brechas que más se aproximaban a los diferentes afloramientos. Estos reconocimientos tuvieron por objeto primordial, la determinación de las características Hidrogeológicas generales en la cuenca, como por ejemplo: las permeabilidades relativas de las unidades que afloran en ella, tipo y probable extensión de los acuíferos, verificación de fallas, etc. Asimismo, la comprobación de la interpretación preliminar, en lo que se refiere a la geología, para lo cual, se visitaron los lugares interesantes, seleccionados por medio de las fotografías aéreas, donde se ratificaron las clasificaciones litológicas, contactos, etc. Otra finalidad de estos reconocimientos fué observar en los diferentes afloramientos sus características geomorfológicas y correlacionarlos con sus propiedades fotogeológicas como son: tono, textura, vegetación, fisiografía, etc., para en base a ello, poder estudiar e interpretar aquellas zonas incomunicadas.

1.- Sección Toluca

Zona Oriental

Los reconocimientos de esta parte de la sección se llevaron a cabo utilizando la carretera Federal No. 15 México-Toluca, desde aproximadamente el Kilómetro 36, hasta la capital del Edo. de México y por el

camino de terracería que parte del poblado de Amomolulco hacia Santiago Tianguistengo. En el primer trayecto las observaciones fueron las siguientes:

En la Estación de Salazar se comprobaron las andesitas identificadas en la interpretación Fotogeológica preliminar, que presentan una textura fanerítica, compacta, de color gris, intemperiza a gris oscuro; en las proximidades de la Estación se encuentran muy alteradas y sanas hacia el NW de la misma, en esa misma dirección pero topográficamente más - alto, afloran andesitas de características similares a las anteriores, pero - de una coloración rosada, e intemperizan a crema. Estas andesitas, se - estimaron impermeables debido a su aspecto y tomando en cuenta también las características del pequeño vaso ubicado en las proximidades de la - estación.

Siguiendo la carretera rumbo a Toluca se observan frentes de lava basáltica joven de aspecto caótico, la roca es de color azul oscuro, compacta, densa, intemperiza a marrón. Al considerar el hábito de esta roca se le asigna una permeabilidad alta, siendo excelente zona de recarga y pudiendo formar buenos acuíferos.

El recorrido continúa en este material hasta llegar al poblado de Amomolulco, donde empiezan los rellenos del valle, continuando por éstos hasta Lerma, donde se observa un cono de ceniza que por su fisiogra-

fía y constitución se ha considerado de los más recientes, los detritos piroclásticos corresponden granulométricamente a ceniza, lapilli y bombas, - todos ellos observables en la cantera localizada al NW del cono y próxima a la carretera. El recorrido continúa en depósitos de aluvión hasta - llegar a la ciudad de Toluca; al NW de dicha ciudad afloran andesitas - jóvenes, su textura es afanítica, de coloración gris oscuro y rosado e intemperiza a café amarillento, están muy fracturadas, por lo que su aspecto en algunos lugares es lajeado, se diferencían de las andesitas de Salazar por su morfología, textura y grado de alteración. Cubriendo a estas andesitas se encuentran depósitos de talud y toba fina de color café oscuro.

Amomolulco-Santiago Tianguistengo

Del poblado de Amomolulco se llega a Ocoyoacac, siguiendo aproximadamente los límites del derrame de basalto ya descrito en el recorrido anterior, que presenta las características caóticas típicas de los frentes de lava, también se observaron los afloramientos de toba volcánica, de color gris claro, compacta aparentemente impermeable que intemperiza a un color rojizo. Para continuar sobre rellenos y aproximadamente a 5 km de Amomolulco, se comprobaron derrames basálticos similares a los que afloran a la entrada de ese poblado, 3 km más adelante aflora una roca andesítica muy similar a la de Toluca, pero de coloración rosada que intemperiza a un color pardo; para terminar el recorrido sobre rellenos y toba volcánica.

De Toluca se tomó la carretera a Metepec, donde se observó el cono volcánico compuesto por materiales piroclásticos que varían de tamaño de toba gruesa hasta bombas; este cono es semejante al de Lerma siendo un material muy permeable que representa una excelente zona de infiltración.

Zona Occidental

Toluca-Temascaltepec

Desde la ciudad de Toluca este recorrido se efectuó en rellenos y posteriormente en tobas lacustres, la cual se presenta en potentes espesores y cuyos estratos están constituídos por toba fina y gruesa siendo su coloración café claro y café oscuro, apreciándose en ellas algunas capas de toba pumítica, de color gris claro, lo que marca una variación en la permeabilidad de estas tobas; posteriormente se encuentra material piroclástico formado por toba fina de color café rojizo y algunos fragmentos de carácter andesítico y basáltico, este material se observa en algunos lugares compacto, atribuyéndosele por ello, una permeabilidad variable. En el parteaguas se encuentra una roca andesítica, muy alterada, de textura fanerítica y color gris, de poca compacidad, correlacionable por sus características, fotogeológicas estratigráficas e hidrogeológicas, con la que se encuentra en la Sierra de - Las Cruces.

II.- Sección Perales

Zona Oriental

Este recorrido se llevó a cabo siguiendo el camino de terracería, que parte del poblado de Ixtlahuaca hacia las poblaciones de Ostotitlán, San Felipe Santiago y Nativitas, durante el trayecto se observaron las tobas lacustres, que se localizan en general hacia la parte baja de la cuenca, estas tobas están formadas por capas sensiblemente horizontales, de diferente granulometría; en alternancia se presentan capas de toba fina de color café claro y café oscuro, y toba pumítica de color pardo, los espesores varían de 0.30 m a 1.40 m. Por las características de depósito y la variación en su porosidad, es de esperarse que algunas capas sean buenos acuíferos, mientras que otras actuarán como confinantes o semiconfinantes.

Siguiendo el recorrido hacia la Sierra de Las Cruces, los depósitos de piamonte están constituídos por materiales piroclásticos, formados por fragmentos que varían de tamaño desde toba fina hasta bombas, siendo los fragmentos más grandes de naturaleza andesítica. Subiendo topográficamente se llega al contacto con las andesitas que constituyen la Sierra, éstas son de textura fanerítica, presentando algunos fenocristales de color gris - crema, su color es gris y topográficamente más arriba rosado, se encuentran muy intemperizadas, por lo que su morfología es arredondada, están cubiertas

por una capa de suelo residual de aproximadamente 80 cm de espesor. - Hidrogeológicamente se considera esta andesita de permeabilidad baja. Por sus características megascópicas, estratigráficas y fotogeológicas, se correlacionan con las que se encuentran en los parteaguas de la Sección Toluca.

Zona Occidental

Esta porción de la cuenca se encuentra comunicada sólo por un camino de terracería, que parte desde la población de Ixtlahuaca hacia - San Felipe del Progreso, su dirección es sensiblemente paralela a la falla de rumbo NW-SE que en el plano se indica como probable continuación de la falla de Perales, durante este reconocimiento, se examinaron los depósitos de tobas lacustres, ya descritas con anterioridad. A lo largo del - trayecto se observa el cantil formado por la falla, en la cual, el bloque caído está al NE, coincidiendo con la parte baja de la cuenca, su escarpe está formado por fragmentos de basalto, aglutinados con una toba fina de color pardo. Más adelante, subiendo a la Presa de Tepetitlán, se observan basaltos que por su morfología y posición estratigráfica, se les ha considerado más antiguos que los encontrados en la Sección Toluca (Zona Oriental); son de color gris oscuro, de textura afanítica aunque vesicular, intemperizan a crema y marrón, en la cercanía de la falla se encuentran muy alteradas por efectos del metamorfismo dinámico, producto de la falla. Hidrogeológicamente se estima que: son permeables, con alta capacidad de infiltración

pudiendo formar buenos acuíferos.

III.- Sección Atlacomulco

Zona Oriental

Teniendo esta zona una comunicación muy pobre, ya que solo - cuenta con un camino de terracería, fue utilizado éste para la ratificación de la interpretación fotogeológica preliminar, este camino parte de la carretera Toluca-Palmillas a la altura de Sto. Domingo Guzmán y conduce a la población de Jilotepec de Abasolo. Durante la travesía se observaron los siguientes afloramientos:

Toba lacustre, descrita en la Sección Perales. Hacia el lado NW del camino, aproximadamente a 12 km de la desviación, se localizan derrames de basalto joven, bordeando al cono volcánico de Jocotitlán, su textura es afanítica, color azul oscuro, denso y vesicular; se les considera muy permeables y excelente zona de recarga.

2 km más adelante afloran tobas volcánicas de color gris claro, compactas que intemperizan a un color rojizo, impermeable.

Aproximadamente a 5 km, afloran basaltos como los encontrados en las proximidades de la Presa de Tepetitlán y descritos en el recorrido - Occidental de la Sección Perales, más adelante, vuelven a encontrarse tobas volcánicas, siguiendo en ellas hasta la altura del Cerro de Comunal-timilpan, que es el límite hidrográfico NE de la cuenca, en los cortes del

camino se observan andesitas de textura fanerítica y color rosado, compactas que intemperizan a crema, esta roca puede correlacionarse con la encontrada en la Sierra de Las Cruces y en el parteaguas SW de la cuenca; al igual que aquéllas se le considera impermeable.

Zona Occidental

Para la comprobación de campo en esta zona, se utilizaron los caminos vecinales: Atlacomulco-El Oro-Carmona y Carmona-San Felipe del Progreso-Atlacomulco, de tal suerte que se cubrió un circuito donde se pudieron observar las zonas más importantes.

En los alrededores de Atlacomulco se examinaron afloramientos de basalto joven, que se presentan en forma de derrames, fracturado en algunas zonas y muy permeables, (descritos en la Sección anterior).

Se tomó la carretera a El Oro de Hidalgo y durante el camino se cotejaron los basaltos que aparentemente son más viejos que los de Atlacomulco y semejantes a los que afloran en los alrededores de Tepetitlán; sobre ellos se encuentran tobas volcánicas en potentes espesores.

Esta brecha llega al poblado de Tapaxco y posteriormente a El Oro, donde se siguió hacia Carmona para entrar a la cuenca a una altura de 2,750 m.s.n.m., en los Cerros del Llorón, Poblo Márquez y San Miguel; estos cerros están constituídos por andesitas, faneríticas, de color rosado, que intemperiza a pardo, muy compactas, de aspecto impermeable

y constituyen el basamento de toda la zona NW de la cuenca, como posteriormente se vió, considerándolas por sus características de la misma edad que las de la Sierra de Las Cruces. Sobre ellas se encuentra una toba volcánica gruesa, compacta, de color gris claro y de espesores muy variados, que fluctúa entre 10 y 40 m.

Más adelante se localiza el Cerro del Porvenir, en éste las andesitas se encontraron en el corte de un arroyo, siendo semejantes a las anteriores y sobre ella le superyace la misma toba volcánica. A lo largo del camino se observaron algunos depósitos de relleno, restringidos a las cercanías de los arroyos, de poco espesor y extensión. Posteriormente todo el reconocimiento se verificó sobre esas tobas hasta casi cruzar la cuenca.

Se regresó a Carmona y de ahí a San Felipe del Progreso, volviendo a encontrar las mismas condiciones geológicas ya señaladas, sin embargo, hacia el SE del camino se encuentran las andesitas muy alteradas. Las condiciones geológicas permanecen constantes hasta las proximidades del poblado de San Felipe del Progreso, donde se encuentran depósitos caóticos de basalto con toba fina de color café rojizo en un frente de lava. Estos basaltos, por su estado de erosión, se consideran antiguos y semejantes a los que afloran en las cercanías a la Presa de Tepetitlán. Poco antes de llegar a San Felipe se localizan algunos conos antiguos estratificados, cubiertos por toba volcánica.

En el trayecto de San Felipe a San Miguel, se encuentran las - tobas volcánicas y conos antiguos estratificados, donde los piroclásticos - varían de lapilli a bombas. De San Miguel hacia Atlacomulco se encuentran lavas basálticas y piroclásticos, al E de San Miguel hay pequeñas - llanuras de aluvión.

IV. FISIOGRAFIA

a.- PROVINCIA FISIOGRAFICA

Atendiendo a que una provincia fisiográfica es quella porción más ó menos extensa de la superficie terrestre donde hay manifiesta uniformidad en los 3 aspectos siguientes:

a).- En su estructura e historia geológica

b).- En la influencia de los agentes erosivos y en los resultados de la acción de éstos, y

c).- En la acción que ejercen la humedad y la temperatura - atmosférica y en las condiciones hidrológicas.

Pudiendo tomarse como otro factor independiente la influencia - humana.

La República Mexicana ha sido dividida por diferentes autores - en provincias que si bien en nomenclatura no son iguales, geográficamente corresponden, así tenemos que:

El Ing. Luis Osorio Mondragón formuló con el nombre de División Pentográfica, las provincias de México en 5 zonas ó regiones, en esta clasificación la Cuenca Alta del Río Lerma corresponde a:

"Región Continental", formada por la Altiplanicie Mexicana, - depresión del Balsas, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Cordillera Neovolcánica y las llanuras correspondientes -

al Océano Pacífico y Golfo de México.

La Altiplanicie Mexicana, la subdivide a su vez en dos porciones menores llamadas Meseta de Anáhuac (Mesa Central) y Llanuras Boreales (Mesa del Norte).

La "Meseta de Anáhuac" está comprendida entre las cadenas - Montañosas de la Sierra Madre Oriental, las de la Sierra Madre Occidental, la del Eje Volcánico y las Sierras de la Breña, de Zacatecas y de San Luis. Su altura media es de 2,000 a 2,500 m. La parte más elevada se encuentra al Sur, en los límites con el Eje Volcánico (Sierra Volcánica Tranversal, Sistema Tarasco-Nahoa) donde localizamos la Meseta de Toluca con 2,650 m.s.n.m.; e indudablemente es la región más productiva e interesante del - país. Su terreno es muy accidentado, pues buen número de sierras secundarias lo cruzan en diversas direcciones. Dividido por una sierra en su parte central, formado por la Sierra Gorda, Sierras de San Andrés y de Las Cruces con dirección NW-SE, tenemos al Oriente la Cuenca del Valle de México y al Occidente el Valle de Toluca.

Según las provincias en que divide el país el Ing. Jorge L. Tamayo, corresponde la Cuenca estudiada al "Altiplano Mexicano", el cual divide en 2 regiones Altiplanicie Septentrional y Altiplanicie Meridional.

La Altiplanicie Meridional, en conjunto, muestra una amplia red hidrográfica poco caudalosa, pero que actúa como eficaz agente erosivo que ha formado la sucesión de valles partiendo del de Toluca (2,300 m de altitud

media).

b.- CLIMA Y VEGETACION

Los climas considerando la clasificación hecha por el Meteorólogo Alemán Guillermo Koeppen son los siguientes:

Clima templado lluvioso, con lluvias todo el año (cw) en la cuenca y en el Nevado de Toluca el clima es polar de altura (EB).

De todos los estudiosos de los climas de México, el Sr. Ing. Jorge L. Tamayo es probablemente quien los clasifica y define de una forma más precisa. Siguiendo el criterio de Koeppen y presentando los símbolos utilizados por este autor en su clasificación esquemática, el Ing. Tamayo clasifica los climas del Valle de Toluca de la siguiente forma:

Templado con lluvias todo el año (cf).

La temperatura media del mes más cálido excede a 18°C y la del mes más frío es superior a 0°C, las lluvias se presentan abundantes y distribuídas en todos los meses del año. Tiene un área de dispersión bastante reducida, limitada a las altas cimas, localizada en la Sierra de Las Cruces. Estas superficies están cubiertas de vegetación forestal, en su mayor parte coníferos.

Templado lluvioso con lluvias en verano (cw).

La lluvia se presenta en verano y debe alcanzar alturas superiores a 700 mm, rebasa este límite y queda comprendida entre 900 y -

1000 mm de precipitación anual. La temperatura media del mes más cálido excede a 18°C y la del mes más frío es superior a 0°C. Cubre las áreas más densamente pobladas correspondiendo al Valle de Toluca. A este clima corresponde una vegetación de tipo pradera, caracterizada por plantas herbáceas.

Clima polar de Altitud (EB)

Todas las regiones en que se presenta en México, tienen una elevada precipitación, localizada principalmente de junio a octubre y las partes que ven hacia el Oriente, pueden tener precipitaciones excepcionales y de alguna importancia en el invierno. La temperatura media del mes más caliente es inferior a 10°C y la correspondiente al mes más frío inferior a 0°C. Su clima es de Tundra y se presenta en las grandes alturas de nuestras serranías principalmente arriba de los 3,000 m, se localiza en el Nevado de Toluca.

La parte montañosa de alta precipitación, tuvo originalmente valiosos bosques de coníferas (pino, oyamel, ciprés, cedro blanco, etc.) y en el resto de la cuenca de bosques de zona templada (encino, pino blanco, madroño, linaloe, aile, copal, piñol, etc.). La exhaustiva explotación de los últimos decenios, ha destruído gran parte de las existencias forestales, por lo que el Gobierno Federal implantó una rigurosa veda y actualmente, las explotaciones, cuando menos las autorizadas, se reducen al corte de leña y de -

pequeñas cantidades de madera aserrada y elaboración de carbón.

Además de la vegetación ya señalada existen en la zona los - siguientes:

Maíz (semilla comestible) Zea mays L.

Ocote blanco (Arbol resinoso) Pinus leiophylla Ch. et Schl.

Palo amarillo (Arbusto) Odostemon gracilis (Hartw) st.

Pino real (Arbol resinoso, proporciona madera) Pinus ayacahuite K. Ehrenb.

Rejalgar (hierba, raíz comestible) Colocasia antiquorum Schott.

Trébol del Monte (Hierba Medicinal, aromática) Didymaca Mexicana Hook.

Capulincillo (Arbusto) Heliocarpus sp.

Encino capulincillo (Proporciona madera) Quereus colimae Trel.

Encino delgado (Proporciona madera) Quereus laurina H. et B.

Hierba del Becerro (Hierba) Calea scabrifolia Benth et Hook.

Zacatón liso (Pasto) Muehlenbergia gracilis (H.B.K.)

c.- OROGRAFIA

La Cuenca del Alto Lerma, queda comprendida dentro de la - Coordillera Neovolcánica, forma parte de la Mesa de Anáhuac, siendo la más elevada del país (2,650 m.s.n.m.), estando delimitada de la siguiente forma:

Hacia el Oriente de la cuenca, con dirección Norte-Sur, se - encuentra el Sistema Orográfico Central, que recibe los nombres locales - siguientes: Monte de Ocuilán, Sierra de Las Cruces, en la que se destaca una porción llamada Monte Alto y otra Monte Bajo, en una prolongación hacia la cuenca está la Sierra de Jocotitlán, cuyo elemento principal es - el cerro del mismo nombre. Este sistema se puede considerar como una - prolongación hacia el Sur de la Sierra de San Andrés y recorre los municipios de Juiquipilco, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán y Lerma, donde se encuentran alturas importantes como los Cerros de La Catedral, Las Palomas, Cervantes, El Molinillo, El Organo, La Peñuela, Loma Larga, Coronillas y Peraltas. Otro ramal de este sistema se dirige hacia el Sur partiendo de la Sierra de Las Cruces, recorriendo el Municipio de Ocoyoacac, donde se encuentran los Cerros de El Angel, Carboneras y Ajolotes, en Tianguistengo, están los Cerros El Muñeco, La Leona y Gachupines. Constituye el parteaguas entre el Río Lerma y el Río Pánuco, sirviendo en buena parte como límite político entre el Edo. de México, Edo. de Morelos y el Distrito Federal.

En la parte Occidental y Suroccidental, se localiza el sistema formado por una serie de serranías con dirección Sureste-Noroeste que limita la cuenca, tiene como punto de partida el importante volcán llamado -

Xinantecatl ó Nevado de Toluca que es el 4o. por su elevación de la - República. Los ramales que forman este sistema montañoso se introducen en los municipios de Toluca, donde son notables los Cerros de Tlacotepec, San Felipe y Metepec, en Calimaya donde están los Montes de Calimaya que se prolongan hasta Tenango del Valle donde se encuentra el Cerro del Calvario. Más al Norte pero perteneciente a este sistema encontramos - ramales importantes donde son notables los Cerros de La Campana, La Gavia, La Calera, Vilchis, La Cruz, La Teresona, Santiago y Santa Cruz que rodean a la ciudad de Toluca. Después se prolonga para ligarse con la Serranía de San Andrés en el Edo. de Michoacán. Forma el límite entre - la Cuenca del Alto Lerma y el Alto Amacuzac, formador del Balsas.

Finalmente hacia el Norte queda limitada el área de estudio, - por un ramal de los sistemas Acambay y Jilotepec, entre los que destacan, de Occidente a Oriente, el Monte de La Concepción y los Cerros San Miguel, Pablo Marquéz, El Llorón, Santa María Narishe, Atlacomulco, - Deshpe, Comunaltimilpan, Las Palomas y el Cerro Seco.

Las principales elevaciones son:

Nevado de Toluca ó Xinantecatl - 4558 m.s.n.m.

Cerro de Jocotitlán - 3910 m.s.n.m.

Cerro de La Campana - 3375 m.s.n.m.

d.- HIDROGRAFIA

La Cuenca estudiada, pertenece al sistema hidrográfico Lerma-Chapala-Santiago, formado por dos elementos fluviales, siendo el tercero el Lago de Chapala.

El Río Lerma nace en la Laguna del Pueblo de Almoloya del Río, alimentado por siete abundantes manantiales. Recorre con dirección NNW la campiña de Toluca, formando la ciénega temporal de Lerma, cerca de la ciudad de este nombre y en su trayecto recibe varios afluentes, como son:

Margen derecha (aguas abajo) ríos Tianguistengo, Ocoyoacac, Atarasquillo, Ameyalco, Otzolotepec, San Pedro, Caparrosa, Temoaya y Santo Domingo.

Margen izquierda, ríos Verdiguel, Tecaxic, Almoloya, Santa María, Tejalpa, Jaltepec y La Gavia.

Cruza después llanuras y cañadas, desciende a los planos menos elevados del Bajío y desagua en el Lago de Chapala, del Lago de Chapala sale el Río Grande de Santiago ó Tololotlán, cruza el Edo. de Jalisco hacia el NW, se interna entre los contrafuertes y asperezas de la Sierra Madre Occidental y tras un tortuosísimo trayecto desciende a la planicie exterior, para desaguar en amplio delta en el Océano Pacífico.

Por su régimen fluvial, el Río Lerma pertenece a los Ríos de - Meseta, es alimentado por fuente permanente y por las lluvias de verano y temporales de otoño.

Se encuentran en la cuenca las siguientes lagunas: Almoloya - del Río, Tianguistengo, Lerma, San Felipe del Progreso y Atlacomulco.

Las presas son: J. Antonio Alzáte ó San Bernabé, La Gavia, Tepetitlán y J.T. Fabela.

Se cuenta con varios distritos de riego, entre los que destacan los de Ixtlahuaca y Atlacomulco.

V. GEOLOGIA

a.- GEOMORFOLOGIA

El estudio analítico de la Geomorfología de la región, según sus principales factores de control, es el siguiente:

La estructura principal está constituída por el Valle del Alto Lerma de orientación NNW-SSE, originado por efectos del diastrofismo y vulcanismo que la zona ha sufrido. El paisaje del Valle muestra varias estructuras locales, entre las que tenemos: montañas volcánicas, cerros volcánicos, mesetas de lava, acantilados producidos por falla, estratos horizontales rellenando la parte baja, algunas planicies de aluvión, etc.

La litología está formada en su mayoría por rocas ígneas extrusivas, de naturaleza intermedia a básica, las primeras predominan en el parteaguas general de la cuenca, las segundas están formando corrientes de lava y conos cineríticos, ambas forman depósitos piroclásticos, que en su granulometría varían de tobas finas a bombas y en algunos casos constituyen aglomerados. Ocasionalmente rellenando las partes bajasy confinada a las cercanías de los arroyos se encuentran depósitos de aluvión.

En la evolución morfológica, han intervenido procesos constructionales, provenientes del interior de la corteza terrestre, como son el diastrofismo y vulcanismo, designados por Gualterio Penck como endógenos

y por Lawson como epigénicos, así mismo, procesos destruccionales, exógenos ó hipogénicos.

Los procesos construccionales los citamos por su influencia en la configuración del paisaje, pero su análisis, se hará en el capítulo de Tectónica.

Los procesos destruccionales, imprimieron sus características en el panorama, entre ellos destaca por su fuerte impresión la erosión por la acción del agua corriente, asociada con el intemperismo y la remosión de masas.

Siguiendo los criterios que se utilizan en el análisis de la configuración del drenaje expuestos por el Sr. Ing. Felipe Guerra Peña, - (Boletín No. 23 de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, p. 158) podremos decir:

A.- Análisis individual del drenaje

El Río Lerma pertenece a la categoría de río retorcido ó sinuoso, formado en su primera parte por meandros cerrados, que después de cruzar el Estrechamiento de Perales son abiertos en cada una de las - zonas anteriores, se observa que su gradiente topográfico es regular y - diferente entre sí. El ángulo de confluencia de sus tributarios en general es agudo y obtuso; en algunos casos recto, como ocurre en las inmediaciones con la falla de Perales; su cauce permanece inundado, siendo

su anchura más ó menos constante, las orillas son en general de pendiente suave en la parte interior de los meandros y de fuerte pendiente en la orilla externa, y de la misma altura relativamente.

B.- Clasificación Genética

Según A.W. Grabau (1932), modificada por O.D. von Engeln, presentada por el Ing. Felipe Guerra Peña en la p. 82 del Boletín No. 22 de la Sociedad de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México.

El Río Lerma es del tipo consecuente constructivo, producido por la elevación de la cuenca y puede clasificarse como superpuesto, al considerarlo con relación a la falla de Perales.

Entre los ríos secundarios de la cuenca, se advierten los siguientes tipos: consecuentes, constructivos, relacionados a corrientes de lava y conos volcánicos.

Consecuentes, constructivos, producidos por movimientos epirogénicos que se observan en la parte baja del valle.

Insecuentes de escarpa de falla, localizados en la parte Occidental de la falla de Perales.

Subsecuentes, se encuentran hacia el Oriente del Río Lerma, asociados con la misma falla, también en contactos entre dos rocas de di-

ferente resistencia, como por ejemplo en las cercanías de San Francisco, al Oriente de Xonacatlán.

Obsecuentes, en la escarpa de la falla ya mencionada.

C.- Clasificación sistemática de las configuraciones del drenaje

Sobre ésto el Sr. Ing. Felipe Guerra Peña dice:

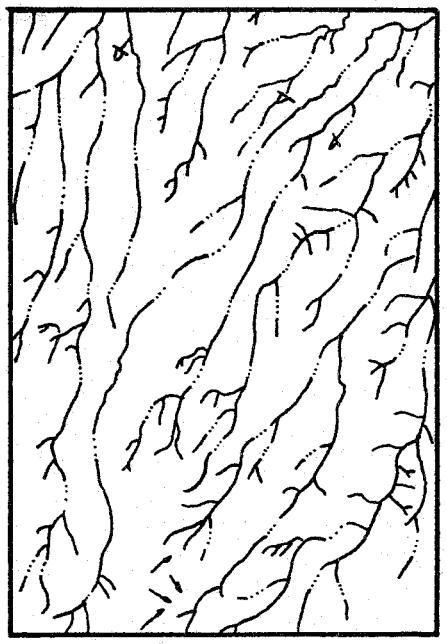
"La clasificación sistemática de los tipos ó configuraciones del drenaje ha sido llevada a cabo por diversos especialistas, tanto geógrafos como geólogos, fisiógrafos ó geomorfólogos, intérpretes de fotografías aéreas casi todos. El número de unidades de clasificación varía para cada uno de ellos, a causa de que mientras unos fijan su atención en los tipos fundamentales de configuración del drenaje, otros extienden su análisis a los tipos de ellos derivados, inclusive hasta los más complejos".

Es posible hacer una clasificación sistemática, diviendo en 2 grandes grupos principales: "Configuraciones naturales" y "Configuraciones artificiales". El grupo de las "Configuraciones naturales" se puede subdividir en: "Configuraciones ordenadas ó regulares", "Desordenadas ó irregulares" y "Configuraciones especiales", entendiendo convencionalmente por regulares u ordenadas a aquellas que presenten características de relación espacial más definidas. Las "Configuraciones especiales", corresponden a tipos muy particulares y de perfiles muy marcados, del drenaje.

Los treinta y tres tipos resultantes se agruparían así:

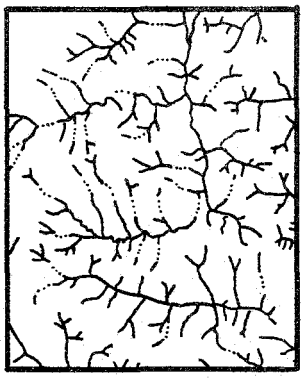
TIPOS DE DRENAJE	I- Configuraciones naturales del drenaje	1- Ordenada o Regular	A- Dendrítica	A_1- Subdendrítica A_2- Pinada A_3- Asimétrica
			B- Enrejada	B_1- Rectangular B_2- Angular
			C- Paralela	C_1- Subparalela C_2- Colinear
			D-Radial	D_1- Centrífuga D_2- Centrípeta D_3- Dicotómica D_4- Distributaria
			E- Anular	
			F- Trenzada	
			G-Kárstica	
		2- Desordenada o Irregular	A- Anastomosada B- Reticular C- Retorcida D- Lagunar E- Errática F- Compleja G- Anómala H- Fantasma	
		3- Tipos especiales	A- Yazoo B- Cubeta glaciárica C- Termokárstica D- Espoloneada E- Elíptica	
	II- Configuraciones Artificiales del drenaje.		A- Rectilínea B- Ilusoria	

Tomada de la hoja No. 101, del Boletín No. 23 de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México.



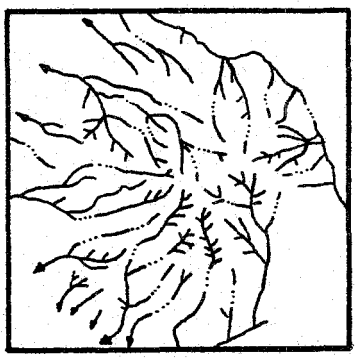
Tipo de drenaje:

Configuración natural, ordenada, paralela localizada en las faldas del Nevado de Toluca en piroclásticos, Esc. 1:100,000.



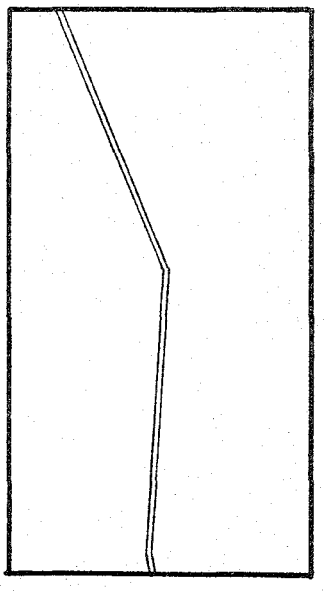
Tipo de drenaje:

Configuración natural, ordenada, dendrítica. En tobas lacustres. Esc. 1:100,000.



Tipo de drenaje:

Configuración natural, ordenada, radial, centrífuga. Se encuentra en los alrededores de San Francisco, en andesitas jóvenes. Esc. 1:100,000.



Tipo de drenaje:

Configuración artificial, rectilínea. Canal del - Lerma. Esc. 1:100,000.

D.- Textura del drenaje

La textura del drenaje se relaciona con el espaciamiento de las corrientes tributarias, la importancia de este concepto estriba en que denota la capacidad de permeabilidad en los diferentes materiales, tan esencial en los estudios que como el presente, van encauzados al análisis de la capacidad del subsuelo de contener agua, además, este criterio fué usado para correlacionar los diferentes materiales rocosos y establecer la estratigrafía convencional de la cuenca.

De lo anterior podemos decir, tomando una clasificación arbitraria de fina a muy gruesa que:

En las andesitas antiguas se presenta una textura fina, denotando su impermeabilidad.

Basaltos antiguos, su textura es mediana, debido probablemente a que su alteración ha formado una capa impermeable.

Piroclásticos y lahares, su textura es variable, denotando por consiguiente variaciones en su permeabilidad.

Conos volcánicos viejos; su textura es mediana y por lo tanto se consideran permeables.

Basaltos de edad intermedia, su textura es francamente abierta, teniéndose en ellos una alta capacidad de infiltración.

Andesita joven: su drenaje es cerrado, o sea de textura fina,

impermeables.

Tobas volcánicas: textura fina, poco permeables.

Conos volcánicos jóvenes: textura muy gruesa, muy permeables.

Basaltos jóvenes: ocasionalmente presentan drenaje muy abierto, siendo por ende su permeabilidad muy alta.

Tobas lacustres, de textura fina, sin embargo, debemos tener en cuenta que se trata de material interestratificado de diferente granulometría y permeabilidad.

E.- Densidad del drenaje

Entendiendo por densidad "la longitud total de las corrientes fluviales dentro de un área, dividida por el área".

Aún cuando en este concepto hay discrepancia entre los autores, la relación entre la densidad de las corrientes con la litología y su permeabilidad es clara. Aplicada a este caso los resultados son semejantes a los obtenidos con la textura.

F.- Homogeneidad ó uniformidad del drenaje

Este concepto se utiliza en la correlación de las diferentes unidades, salta a la vista la semejanza de uniformidad del drenaje con relación a la litología al observar el plano fotohidrogeológico, que se acompaña, razón por la cual se considera innecesario describirla.

G.- Grado de integración

Según D.R. Lueder (1959), el grado de integración del drenaje indica:

1.- Su grado de uniformidad y erosionabilidad (textura, permeabilidad y grado de infiltración del escurrimiento).

2.- El alcance ó extensión de l a erosión en la zona.

3.- La existencia y localización de determinados factores modificadores, como características de los materiales, expresiones topográficas, etc.

La aplicación de lo anterior, a nuestro caso, dá una relación de permeabilidad, que confirman a los obtenidos por medio de los anteriores criterios.

Siguiendo el análisis de los procesos destrucciones, toca hacer mención al intemperismo, que como auxiliar de la remosión en masa ha trabajado en el modelado de la topografía de la cuenca; éste actúa principalmente de un modo químico, por el efecto combinado del agua y los ácidos orgánicos complementado por la variación del clima y las lluvias torrenciales, sobre todo en las andesitas que están formando el parteaguas que bordea la cuenca. El debilitamiento, fragmentación y descomposición de esta roca y el efecto de la gravedad produce deslizamientos en las pendientes fuertes, originando depósitos de talud pudiendo ser auxiliado -

por el agua y saturado el material, desplazarse pendiente abajo. Los efectos de la combinación de estos procesos, son la forma arredondada de estas andesitas y la producción de suelos residuales que están operando en un - fenómeno de agradación.

En forma menos importante están trabajando en el resto de la cuenca, siguiendo por sus efectos en los depósitos piroclásticos que constituyen en general los depósitos de pie de monte.

La erosión de las diferentes rocas, mostrada en las fotografías aéreas, dá una base más para identificar las diferentes unidades litológicas, su etapa en el proceso erosivo y los agentes que intervinieron, sirviendo todo ello para correlacionar los afloramientos existentes. Entre - las características sobresalientes que corresponden a los tipos de rocas, - tenemos:

Las andesitas antiguas tienen un relieve arredondado.

Los conos volcánicos y derrames basálticos antiguos, muestran una erosión madura; en cambio los jóvenes muestras un marcado contraste de juventud.

Las andesitas jóvenes están en una etapa joven con pendientes fuertes y morfología aguda.

Las tobas lacustres se erosionan en su forma típica, mostrando sus diferentes capas como franjas de espesor constante.

Los depósitos pircolásticos se presentan afectados por cañadas en forma de V abierta.

Las tobas volcánicas muestran formas onduladas.

El estado ó etapa geomórfica en que se encuentra la cuenca, se ha considerado de rejuvenecimiento dinámico al tomar en cuenta lo si-- guiente:

Las andesitas que forman el parteaguas, muestran una morfología arreondada, sin embargo, sus arroyos están trabajando sobre todo en sentido vertical.

El drenaje en la cuenca, no está bien constituído, como lo - demuestran las lagunas de Lerma y algunas zonas pantanosas.

El Río Lerma, está erosionando las tobas lacustres, pudiendo tomarse en forma muy gruesa la cota de la cima de estas tobas, como el antiguo nivel base de erosión regional.

La cuenca al ser levantada por movimientos epirogénicos, desagua la laguna, dejando reductos en las proximidades del poblado de - Lerma, dando por resultado que su nivel base de erosión se abatiera.

b.- ESTRATIGRAFIA

La estratigrafía ha sido formada, tomando en cuenta las características observadas en las fotografías aéreas por medio del estereoscopio,

señaladas en el capítulo de Fotohidrogeología y explicadas algunas de ellas en el inciso anterior, también han servido de base los reconocimientos de campo, siendo fundamental la aplicación de la "Ley de la Superposición".

Debe considerarse ésta secuencia estratigráfica como "Informal", debido a que no cumple con los requisitos señalados por el Código de Nomenclatura Estratigráfica, ya que el criterio primordial para agrupar los materiales líticos, ha sido, tomando en cuenta sus propiedades hidrogeológicas.

A continuación se describen las unidades identificadas, tomando en cuenta sus edades geológicas inferidas y citadas de la más antigua a la más joven.

Unidades del Terciario

Andesitas (T_A)

Esta unidad se identificó en las fotografías aéreas, por su forma arredondada, configuración dendrítica del drenaje, fuerte erosión, estado geomórfico de madurez y su vegetación compuesta principalmente por coníferas. Por su posición vertical, se ha considerado como la más antigua de la cuenca y seguramente constituyen el basamento general; forman en su mayoría, el parteaguas límite de la zona de estudio.

Su aspecto megascópico es el siguiente: textura fanerítica, de

color gris y rosado, presenta fenocristales prismáticos de color crema, - muy fracturada y alterada por la acción del intemperismo, cambiando - su color a crema y gris oscuro. Se encuentra sana en lugares muy contados, como son algunos cortes de caminos y en profundas cañadas. Está cubierta generalmente por suelos residuales, cuyo espesor varía de 1 a 10 m. Esta cubierta residual y su gran alteración hacen que sea una roca impermeable y poco asequible a la infiltración.

Basaltos del Terciario Inferior (T_B)

En el estudio estereoscópico de las fotografías aéreas, se presentan con su característica típica de derrame, con líneas de fluidez, - drenaje dendrítico, de textura gruesa, aparentemente en algunos lugares está cubierta por una capa de suelo y está menos alterado que las andesitas. Se localizan en el extremo Sur-Este de la cuenca al Noreste y en un afloramiento de menor dimensión en el parteaguas Noroeste. Por su posición estratigráfica, descansando dicordantemente sobre las andesitas antiguas se infiere que son más jóvenes que éstas, pero más antiguas que los otros basaltos ya descritos.

Debido a lo inaccesible de sus localidades, este basalto no fué visitado en los recorridos de campo, pero como es bien sabido los - basaltos son en general permeables y buenas zonas de recarga.

Piroclásticos y Lahares (T_p)

En esta unidad se agrupan los siguientes materiales:

Piroclásticos, varían en tamaño desde bombas hasta toba fina, se encuentran expuestos de un modo típico en las faldas del Nevado de Toluca, donde muestran una selección en su granulometría de gruesos a - finos, a partir del volcán hacia su periferia; esporádicamente se encuentran clásticos gruesos entre la toba, estos fragmentos son de naturaleza - intermedia y básica; la toba es de color café rojizo.

Como otro elemento de esta unidad tenemos los aglomerados, que se encuentran hacia el Oriente de la Sección de Perales, están formados por clásticos angulosos del tamaño de bombas, de naturaleza andesítica, con una matríz de toba fina, café. Se localizan también formando el escarpe de la Falla de Perales en su continuación Occidental, aquí los clásticos gruesos son de naturaleza basáltica, al igual que en los - alrededores del Cerro de La Campana.

Lahares están próximos a San Pedro Atlapulco, su aspecto petrográfico es semejante al de los aglomerados, pero su forma de depósito se muestra diferente y propia de "nubes ardientes".

Esta unidad, aún cuando consta de elementos que litológicamente son diferentes, presenta las siguientes similitudes:

La forma de erosionarse en valles de V abierta, drenaje de tipo consecuente paralelo, abierto, poco denso, morfológicamente son de pendientes contínuas decrecientes hasta coincidir con los depósitos del fondo del valle. En los reconocimientos de campo, se observaron capas de toba pumítica interestratificada y una variación en la compactación de este material; fotogeológicamente se encontraron manantiales en las proximidades de los poblados de San Bartolo, Nativitas y San Lorenzo en la Zona NE-E de las faldas del Nevado; debido a lo anterior, esta unidad debe tener buenas zonas de permeabilidad y recarga.

Conos volcánicos antiguos (T_{cv})

Dentro de los aparatos volcánicos que existen en la cuenca se han encontrado algunos más antiguos, a los que se les asignó una edad del $T_e$rciario; éstos se presentan con su forma cónica típica, parcialmente erosionados y cubiertos por una delgada capa de suelo. Para su identificación se usó su morfología, el drenaje radial centrífugo que presentan el estado geomórfico en que se encuentran. En su gran mayoría son del tipo de Estratovolcanes, presentando una alternancia de corrientes de lava y material piroclástico. Se les considera permeables y buenas zonas de recarga.

Basaltos del Terciario Superior (T_b)

Están asociados con los conos volcánicos ya descritos; forman mesetas que están cubiertas de un material tobáceo, cuyo espesor varía de 5 a 15 m. Su drenaje es abierto, poco denso, de tipo dendrítico, se localizan distribuídos en toda la cuenca, fueron observados en los alrededores de la Presa de Tepetitlán, su aspecto megascópico es el siguiente: de color gris oscuro, textura afanítica, estructura vesicular, intemperizan a crema y marrón. Se consideran permeables, con alta capacidad de infiltración, pudiendo formar buenos acuíferos.

Unidades del Cuaternario

Andesitas Jóvenes (Q_A)

Entre las estructuras volcánicas que hay en la cuenca, se identificaron algunas de ellas de naturaleza andesítica; su descripción petrográfica y megascópica es en general la siguiente: color gris oscuro y en ocasiones rosado, intemperizan a colores café amarillento y pardo, de textura afanítica, muy fracturadas, por lo que muestran a veces un aspecto lajeado, su etapa geomórfica es de juventud, fotogeológicamente muestran un tipo de drenaje radial centrífugo, de textura fina a mediana, resistentes a la erosión; sirviendo las anteriores características para diferenciarla de la Andesita del Terciario.

De lo anterior se infiere que, esta roca aún cuando está frac-

turada y posee porosidad secundaria, su permeabilidad es reducida; como - zona de recarga, su capacidad de infiltración es deficiente.

Tobas Volcánicas (Q_t)

La identificación de esta roca se llevó a cabo al observar sus propiedades fotogeológicas, tales como: drenaje dendrítico, su morfología es arredondada, la erosión ha sido débil. Su descripción en el campo es la siguiente: color gris claro, compacta, de grano fino, que intemperiza a rojizo, su espesor varía de 10 a 40 m. Se encuentran asociadas a - conos volcánicos y en muchos casos están cubriendo al basalto y parcialmente a las andesitas.

Son impermeables, con capacidad de infiltración reducida, a profundidades adecuadas pueden actuar como confinantes.

Conos Volcánicos Jóvenes (Q_{cv})

Estos aparatos volcánicos son muy fáciles de identificar debido a su aspecto que imprime un sello muy especial al paisaje, son conos - que muestran su forma intacta, ésto es, que no han sido atacados por la erosión, la mayoría de ellos muestran su cráter bien conservado, teniéndolo algunos taponado, presentan una vegetación boscosa densa, que no oculta su morfología en las fotografías donde aparecen en un tono gris muy oscuro y su drenaje junto con su fisiografía denotan la etapa de juventud en la que se encuentran.

La mayoría están constituídas por material cinerítico, (lapilli, bombas y tezontles), no obstante, hay algunos estratovolcanes, no siendo posible diferenciarlos fotogeológicamente.

Son permeables, con alta capacidad de infiltración, pudiendo ser excelentes acuíferos si tienen la profundidad necesaria cuando se encuentran sepultados en las partes bajas.

Basaltos Jóvenes (QB)

Se localizan hacia el SE, SE-E de la cuenca. Se identificaron fotogeológicamente por la asociación que muestran con los conos volcánicos jóvenes que al igual que éstos, marcan un fuerte contraste en el paisaje, su tonalidad negra oscura en que fotografían, su drenaje que superficialmente es nulo o casi nulo, siendo en su mayoría en forma subterránea como lo demuestran su carencia superficial, los manantiales y lloraderos que produce, la forma clásica de mesetas de lava, en las que se aprecian claramente líneas de fluidez y fracturas debidas a su enfriamiento rápido, algunos tienen vegetación muy escasa de tipo herbáceo. En el campo, los frentes de lava muestran el aspecto caótico que las caracteriza; la roca es afanítica, de color azul oscuro, muy poroso y vesicular, intemperiza a un color marrón rojizo.

Se estima, son los más permeables y la mejor zona de recarga.

Tobas Lacustres (Q_t)

Fotogeológicamente muestran las siguientes características:

Se encuentran en la parte baja de la cuenca, su aspecto es - aparentemente impermeable debido a la presencia de bordos distribuídos - en toda su superficie y drenaje dendrítico, cerrado y denso que las distingue, sin embargo, su característica más importante y espectacular es que al ser atacadas por la erosión, sobre todo por la acción de las aguas - superficiales encauzadas que al rebajar su cauce, hace aflorar las capas que forman franjas que son sensiblemente paralelas y en ocasiones, al encontrarse una capa resistente se forman pequeñas terrazas.

La descripción de sus afloramientos es: capas sensiblemente - horizontales, de diferente tamaño de grano y color, presentándose estratos de toba fina café clara y gruesa café oscuro, intercaladas entre éstas, se encuentra toba pumítica gris clara, los espesores varían de 0.30 m a 1.40 m.

Por las características de depósito y granulométricas, se infiere que algunas capas serán excelentes acuíferos, mientras que otras actuarán como confinantes o semiconfinantes.

Depósitos Aluviales y de Relleno (Q_{al})

Esta unidad se encuentra localizada en su mayor parte en la zona baja de la cuenca, hacia el Oriente de Toluca, en una franja -

angosta por la que corre el Río Lerma y en algunos lugares aislados como por ejemplo a los alrededores del Vaso de Salazar.

En las fotografías aéreas su identificación se efectuó por medio de los siguientes criterios:

Tono gris oscuro, morfología caso horizontal y presencia de cultivos.

Está formada por materiales de acarreo que varían de arenas a matatenas, arredondadas, en espesores reducidos.

Hidrogeológicamente, este material no tiene importancia debido a su espesor y extensión, aún cuando tiene una permeabilidad muy alta.

c.- TECTONICA

La Cuenca del Alto Lerma, es una zona eminentemente volcánica y por ende, es lógico pensar que se trata de una zona de debilidad, que durante su historia geológica ha sufrido diversos trastornos tectónicos, por donde ha escapado a la superficie el magma, para formar los diferentes materiales expuestos; al considerar la cercanía con la Cuenca del Valle de México, es presumible que los fenómenos que ha sufrido ésta, se reflejen en la Cuenca del Alto Lerma; siendo el trabajo del Ing. F. Mooser - (1961) prácticamente el único que la trata en su totalidad, se ha usado - éste como una analogía y se infiere lo siguiente:

Al finalizar la Orogenia Laramídica, a comienzos del Terciario, actúan sobre la corteza terrestre esfuerzos Tectónicos Tensionales que la afallan y fracturan, permitiendo la salida del magma; esos esfuerzos - están orientados sensiblemente Este-Oeste y dieron origen al fracturamiento Chapala-Acambay junto con otras fracturas que forman el Grupo San - Andrés. La actividad de esta línea tectónica se manifiesta desde el Terciario Medio hasta el Reciente.

Al Norte de la ciudad de Toluca, en la región de Acambay, ha sido posible estudiar la estructura de la zona fallada, en donde se - forma un graben o fosa tectónica, cuyas fallas componentes se localizan una a 12 km aproximadamente al Sur de Acambay y la otra al Norte del poblado.

Las lavas que surgen de la zona del fracturamiento Chapala-Acambay en el Terciario, fueron esencialmente andesitas y riolitas y en el Cuaternario son adesíticas y basálticas; lo que nos indica que después de agotarse en las cámaras magmáticas el Sial (magmas ácidos) aparecieron los magmas profundos del Sima (magmas básicos).

En todo esfuerzo tensional se producen fracturas transversales aproximadamente a 45° de las primeras y es por ésto que al producirse el fracturamiento San Andrés, se crean a su vez grandes fracturas transversales que dan orígen, por emisiones volcánicas consecuentes, a la -

Sierra de Las Cruces y la Sierra Nevada, aproximadamente en el Plioceno Medio.

Posteriormente en el Plioceno Superior se forma una nueva-zona de fracturamientos que atraviesa a la República Mexicana de Oeste a Este sobre el paralelo 19°, denominada clarión. Su recorrido queda - marcado por los alineamientos de los grandes volcanes de México: Volcán de Colima, Cerro de Tancítaro, Nevado de Toluca, Popocatepetl y Pico de Orizaba. Esta fractura continúa sus movimientos hasta el Cuaternario dando así lugar a una nueva serie de emisiones en ese período. Desafortunadamente no se puede estudiar conciensudamente porque se encuentran cubiertas por las rocas volcánicas que propiciaron.

En la Cuenca Alta del Río Lerma, las fallas más importantes que se observaron fueron las siguientes:

1o.- La falla que se localiza al Sur del poblado de Tenango del Valle, cuya orientación general es Este-Oeste y que seguramente forma parte de la línea tectónica clarión, la cual fué definida por medio de las fotografías aéreas, donde se aprecia claramente que se trata de una falla de tipo normal, siendo el bloque caído el que se encuentra al Norte de ella.

2o.- Falla de Perales, se encuentra en el Estrechamiento del

mismo nombre, tiene aparentemente dos componentes de orientación, al - Este del Río Lerma es sensiblemente Este-Oeste y conforme cruza el río hacia la margen Occidental, va cambiando a una orientación Sureste-Noreste, ocasionando un notable escalón sobre todo en esa nueva posición; existe la posibilidad que se trate de un sistema de fallas y que - en realidad pudiera tratarse de dos diferentes, lo cual se comprobará con las exploraciones geofísicas. Esta falla ó zona de falla dá orígen a una separación en la cuenca formando el Valle de Toluca y el Valle de Ixtlahuaca.

En la parte Oriental de la cuenca, se forma una serie de - fracturas conjugadas a la Falla de Perales, se estima que esta falla fué posterior al paroxismo conocido como de San Andrés y que está relacionada con el sistema clarión.

3o.- Falla de Toxhi de la Zona de Espejel, se presenta en el Valle de Ixtlahuaca aproximadamente a 7 km del Estrechamiento Topográfico de Atlacomulco como un vistoso farallón bien definido, de orientación general Este-Oeste.

Como consecuencia de estas tres fallas y sus dislocaciones, - el Valle de Toluca se encuentra separado, formando dos escalones a los que se les ha llamado Valle de Toluca y Valle de Ixtlahuaca. Asociados con estas fallas y fracturas se encuentran conos volcánicos, lo cual nos -

permite suponer que estos movimientos son posteriores a los de Chapala-Acambay, y que en un tiempo los dos valles formaban uno solo, en el cual se encontraba una laguna.

El drenaje poco desarrollado que se observa nos permite tener otra prueba para confirmar la suposición de la poca edad de estas fallas.

Se piensa que el Valle de Toluca sufrió movimientos de "basculeo" debido a lo siguiente: el gradiente del fondo del valle y la posición del Río Lerma hacia el Oriente, así como la falta de depósitos de pie de monte de la sierra de Las Cruces, siendo también otra indicación la posición de las lagunas a la altura del poblado de Lerma.

Los conos volcánicos presentes en la cuenca muestran dos orientaciones generales que son Suroeste-Noroeste y Este-Oeste.

d.- GEOLOGIA HISTORICA

En la elaboración de la historia geológica del área, se toman en cuenta las edades relativas y solo se citan algunas absolutas que por colindancia con la Cuenca del Valle de México se relacionaron con el trabajo del Sr. Ing. F. Mooser (1961).

Se supone una región con un relieve inicial y litología desconocidos, que en el Plioceno Inferior sufrió esfuerzos tensionales, producto del fracturamiento Chapala-Acambay, los cuales dieron lugar a zonas de

debilidad con orientaciones NNW-SSE por las que salieron a la superficie magmas intermedios que formaron la Sierra de Las Cruces; en una de sus etapas, dada su constitución y viscosidad se produjeron explosiones que lanzaron materiales piroclásticos, los cuales se depositaron en las laderas de los aparatos volcánicos recientemente formados para constituír los aglomerados que se encuentran hacia el Oriente de la cuenca.

Como una etapa final en la diferenciación magmática fueron expulsados magmas básicos que formaron los conos volcánicos, derrames de lava y aglomerados del Terciario.

Posteriormente en el Plioceno Superior nuevos trastornos tectónicos se manifestaron por las líneas de fracturamiento clarión, con su expresión en la cuenca por medio del Nevado de Toluca, donde al igual que en la Sierra de Las Cruces se produjeron explosiones que dieron lugar a los piroclásticos que rodean al volcán.

La acción de las fallas originó que el drenaje de la cuenca se interrumpiera y se formaran dos lagunas, limitadas por las fallas de Tenango del Valle, Perales y Toxhi, donde se depositaron los piroclásticos producto de la acción continuada del vulcanismo formando las tobas lacustres de la zona central; sin embargo, a medida que transcurrió el tiempo, estas lagunas se unieron y con el incremento del depósito las tobas llegaron a formar estratos contínuos. Posteriormente movimientos

epirogénicos provocaron que el drenaje se restablezca y "La Laguna Grande" sea desaguada.

Es muy probable que al final de estos movimientos la falla ó zona de falla de Perales haya vuelto a trabajar, como lo sugiere el hecho que el fondo del Valle de Toluca está cuando menos 50 m más arriba que el fondo del Valle de Ixtlahuaca y sus pendientes son casi horizontales, otro factor es la presencia de algunos arroyos que drenaban con dirección Sur en el Valle de Toluca, los cuales fueron capturados por el Río Lerma como se aprecia en el Estrechamiento de Perales. Esta captura fué producida por la erosión remontante del Río Lerma al descender su nivel base de erosión por efecto del movimiento epirogénico que sufrió la zona.

Un movimiento posterior de basculeo queda marcado en el Valle de Toluca por la posición del Río Lerma, las lagunas de Lerma y los rellenos, también lo sugiere la pendiente del fondo del Valle de Toluca, donde se aprecia una componente S-E que en las proximidades al Estrechamiento de Perales cambia a N-E.

No es posible determinar la edad de las andesitas y basaltos jóvenes, pero seguramente están relacionados con el último movimiento de la cuenca, no obstante la etapa no es posible establecerla en el presente estudio.

VI. HIDROGEOLOGIA

a.- CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS DE LAS UNIDADES IDENTIFICADAS.

En el desarrollo de este tesis, se han ido explicando los diferentes criterios que sirvieron para determinar las propiedades Hidrogeológicas de todas las rocas que forman la cuenca, sin embargo, como ese es el objetivo principal y considerando sería interesante presentarlos en conjunto, aquí en forma resumida se vuelven a exponer:

A).- Criterios Fotohidrogeológicos.- Derivados de la observación en las fotografías aéreas de las siguientes características:

1o.- Del drenaje

1.- Forma
2.- Configuración
3.- Textura
4.- Densidad
5.- Homogeneidad ó uniformidad
6.- Grado de Integración

2o.- Cubierta superficial

3o.- Tonos

4o.- Presencia de manantiales

5o.- Vegetación y agricultura

6o.- Presencia de bordos y presas

7o.- Experiencia en zonas similares.

B).- Reconocimientos de campo.- El valor de éstos estriba en poder observar de una manera directa todas las unidades que forman la cuenca; además de poder obtener información complementaria que ayude y en algunos casos determine las características de las diferentes rocas que afloran en el área de estudio. Las observaciones efectuadas durante estos reconocimientos son las siguientes:

1o.- Características físicas de las rocas, como por ejemplo la presencia de fracturas ó fallas.

2o.- Presencia de manantiales, norias y lloraderos.

3o.- Pozos y su rendimiento específico, los pozos de rendimiento más elevado están localizados en basalto y tobas lacustres con un rendimiento promedio de 100 Lts/seg/m. Los perforados en andesitas tienen un rendimiento promedio de 1 Lt/seg/m y los de rellenos son del orden de 20 Lts/seg/m.

b.- CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS DE LAS UNIDADES IDENTIFICADAS.

A continuación se exponen las características hidrogeológicas de las unidades identificadas en la Cuenca Alta del Río Lerma, en forma resumida; para lo cual se elaboró la siguiente escala arbitraria de permeabilidades: muy permeable, permeable, poco permeable e impermeable; y

de la capacidad de infiltración de muy alta, alta, deficiente y reducida.

Andesitas (T_A)

Impermeable, capacidad de infiltración reducida, prácticamente no forma acuíferos.

Basalto del Terciario Inferior (T_B)

Permeable, buena zona de recarga, formará buenos acuíferos donde la topografía anterior a su depósito lo permita.

Piroclásticos Lahares (T_p)

Muy permeable a poco permeable, capacidad de infiltración - alta a reducida, tiene acuíferos confinados ó semiconfinados.

Conos volcánicos antiguos (T_{cv})

Permeables, capacidad de infiltración deficiente, puede tener acuíferos buenos.

Basaltos del Terciario Superior (T_b)

Permeables, capacidad de infiltración alta, puede tener buenos acuíferos.

Andesitas jóvenes (Q_A)

Poco permeable, capacidad de infiltración deficiente, solo - puede formar acuíferos pobres.

Tobas Volcánicas (Q_t)

Impermeables, capacidad de infiltración reducida, no contiene

acuíferos.

Conos Volcánicos Jóvenes (Q_{cv})

Permeables, capacidad de infiltración muy alta, puede formar acuíferos buenos.

Basaltos Jóvenes (Q_B)

Muy permeables, capacidad de infiltración muy alta, forma - excelentes acuíferos libres ó semiconfinados.

Tobas Lacustres (Q_T)

Algunas capas impermeables y otras permeables, capacidad de infiltración reducida, puede formar acuíferos confinados buenos.

Depósitos Aluviales y de Relleno (Q_{al})

Permeables, capacidad alta de infiltración, puede formar acuíferos someros.

c.- FUNCIONAMIENTO CUALITATIVO DE LOS ACUIFEROS EN LA - CUENCA.

La cuenca en estudio, se divide en dos subcuencas, que son el Valle de Toluca y el Valle de Ixtlahuaca, tomando como referencia - para esta separación al Estrechamiento de Perales.

En el Valle de Toluca, la zona de recarga más importante - la constituyen los depósitos piroclásticos (T_p) localizados en las faldas del Nevado de Toluca. La variación de permeabilidad de los piroclásticos y

el efecto impermeable de las andesitas (T_A) que le subyacen, ayudan a las condiciones de artesianismo que presentan los acuíferos de la zona - baja en las tobas lacustres (Q_T).

Al observar en las fotografías aéreas la pendiente en general E-W en este valle, se tiene que desde el Oriente del Nevado se continúa hacia las tobas lacustres, hasta llegar a un cambio abrupto donde - empieza la Sierra de Las Cruces. Esta circunstancia hace pensar en una continuidad de las capas acuíferas desde el Oriente hasta las partes bajas y es por ello que se le atribuye a los piroclásticos más importancia como zona de recarga y una influencia mayor en el artesianismo en las tobas lacustres.

El funcionamiento cualitativo de los acuíferos, se puede explicar así: las zonas elevadas de mayor precipitación captan el agua y la conducen en forma de acuíferos confinados (piroclásticos) ó libres y - semiconfinados (basaltos) hacia las partes bajas donde se encuentran las tobas lacustres que forman acuíferos confinados y los libres de los rellenos.

En las tobas lacustres debido al gradiente ascendente que presentan sus acuíferos y que las capas confinantes no son absolutamente - impermeables, se producen infiltraciones ascendentes que forman los manantiales, (Lerma) y zonas de nivel freático somero; estos manantia- -

les producen el agua que alimenta en forma constante al Río Lerma pero una gran cantidad se evapora y por lo tanto se pierde, sin que la comunidad la aproveche. Seguramente hay un flujo subterráneo hacia el - Estrechamiento de Perales, pero debe efectuarse en cantidad menor que el que aflora.

Estrechamiento de Perales

Su importancia reside en que forma una boquilla subterránea donde se verifica un flujo del Valle de Toluca hacia el de Ixtlahuaca. Sin embargo la falla ó zona de falla de Perales puede funcionar como una barrera que permita el flujo sólo en los estratos superiores, donde - este fenómeno tectónico no se manifiesta en forma clara.

No es posible definir la zona de flujo hasta no contar con - las exploraciones geofísicas necesarias.

Valle de Ixtlahuaca

Las zonas de recarga más importantes están formadas por los piroclásticos (Tp) de la parte Oriental y el cono volcánico (Q_{cv}) y basaltos (Q_B) del Jocotitlán.

La zona Occidental aún cuando está constituída por basaltos (T_b) y piroclásticos (Tp), no se considera como una zona de recarga favorable, debido a la presencia de la continuación de la falla de Perales que forma un obstáculo subterráneo que impide cuando menos gran parte del flujo -

hacia las zonas bajas, como lo demuestran algunos manantiales y arroyos que nacen en las cercanías de esta falla.

En este valle al igual que en el de Toluca los acuíferos de las tobas lacustres tienen una posición que Fotogeológicamente se aprecia horizontal.

Las zonas de evaporación aún cuando están presentes su número y extensión es menor que en el Valle de Toluca, por lo que se piensa que el agua subterránea perdida por evaporación es en menor cantidad que en el otro valle.

VII. SECUELA DE ESTUDIO PARA LA EVALUACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN UNA CUENCA.

Al considerar que un estudio como el que se presenta, es un análisis cualitativo de las condiciones del agua subterránea y que si bien proporciona una guía en la explotación de ese recurso, no ofrece una - determinación cuantitativa que permita planear su explotación en forma - económica y racional, que es indispensable para el desarrollo de la comunidad, se presenta este capítulo.

Debe recordarse que un estudio Fotohidrogeológico, es una - etapa en la valoración del agua subterránea y que dicho análisis corresponde al campo de la Geohidrología.

La secuela propuesta ha sido elaborada, a partir del programa que para ese fin formó el Sr. Ing. Sáinz Ortíz, basada en los adelantos más recientes que la materia ha tenido y al respecto dice:

"Un estudio Geohidrológico debe enfocarse, en primer lugar, hacia la obtención de los datos básicos indispensables para abordar el problema, realizando los trabajos e investigaciones que resulten necesarios, en segundo lugar, al cálculo de los recursos de agua subterránea en la - zona que se estudia, con base en los datos obtenidos previamente".

La secuela propuesta es la siguiente:

a.- HIDROGEOLOGIA

Información que permita obtener el conocimiento físico de la zona.

1.- Obtención de datos y planos geográficos y topográficos a escalas 1:100,000 y 1:20,000, que permitan conocer la situación geográfica, la altitud, la orografía, la fisiografía y la hidrografía de la zona. Esta - información se completará mediante la obtención de mosaicos aéreos y con fotointerpretación.

2.- Elaboración del estudio Fotohidrogeológico de la zona en cuestión.

3.- Obtención de datos y perfiles de geología subterránea, apoyados en cortes geológicos y en el empleo eventual de métodos geofísicos.

b.- INFORMACION BASICA INDISPENSABLE PARA LA CUANTIFICACION

Información que permita conocer la hidrología superficial

1.- Obtención de datos climatológicos de la zona, con especial atención al régimen pluviométrico, termométrico, evaporación y evapotranspiración, abarcando un período lo más amplio posible.

2.- Obtención de datos hidrométricos de las corrientes superficiales, con especial atención al régimen durante el estiaje.

Es importante que existan estaciones hidrométricas ubicadas en los puntos de entrada y salida de la zona.

3.- Localización de los aprovechamientos de aguas superficiales y determinación del uso y régimen de los mismos.

a).- Bombeos directos desde las corrientes.

b).- Derivaciones.

c).- Presas de embalse, con los datos de funcionamiento de los vasos, etc.

4.- En caso de usos para riego:

a).- Superficies regadas y clase de cultivos.

b).- Volúmenes anuales empleados en el riego.

c).- Régimen de los riegos.

d).- Hidrometría de los desperdicios y retornos.

e).- Balance de las aguas de riego.

5.- Información específica que permita conocer la hidrología subterránea.

6.- Formación del catálogo de los aprovechamientos de aguas subterráneas existentes: manantiales, pozos y galerías filtrantes.

Este catálogo deberá contener, en el caso de los manantiales y galerías, las tres coordenadas de su ubicación; la zona o cuenca en que se encuentra; el Municipio y Estado al que pertenece; su número de registro; el nombre del propietario; las características generales del afloramiento

y el uso que se le dá al agua. Si el manantial es permanente, deberá - anotarse entre qué caudales fluctúa normalmente y si es intermitente, deberán anotarse los meses en que normalmente fluye. Además, cada manantial deberá quedar localizado debidamente en los planos y mosaicos.

Cuando se trate de pozos, el catálogo deberá contener las tres coordenadas de cada brocal; la zona o cuenca en que se encuentra; el - Municipio y el Estado al que pertenece; su número de registro; el nombre del propietario; el uso que se le dá al agua y las características constructivas generales, como son: diámetros y profundidades de la perforación y del ademe; espesor del ademe; ubicación de los cedazos, tuberías ciegas y cementaciones; si cuenta con filtro de grava; el corte geológico y el - registro eléctrico o de rayos gamma; características del equipo de bombeo, datos de aforo y fecha en que fueron hechos; profundidades iniciales de - los niveles estáticos y dinámico y la evolución sufrida hasta la fecha del catálogo; capacidad específica y su evolución; datos de pruebas de bombeo que se hayan efectuado en el pozo. Además deberá asentarse el caudal instantáneo autorizado así como el volumen diario y anual de agua concedidos.

7.- Hidrometría de los aprovechamientos.

La hidrometría de los aprovechamientos es de capital importancia

en los estudios geohidrológicos y por lo tanto, deberá realizarse con la mayor precisión posible.

Por lo que se refiere a los manantiales y galerías, la hidrometría deberá estar basada en aforos contínuos, cuando menos quincenales.

En el caso de los pozos, la hidrometría deberá realizarse, de preferencia, mediante la instalación de medidores de flujo o cuando menos, mediante aforos bimestrales específicos y el registro del régimen de operación de los pozos. Por régimen de operación se entiende, en términos - generales, el tiempo que diariamente funciona el equipo de bombeo y los días del año que se opera.

8.- Información respecto al régimen piezométrico en los acuíferos.

Esta información deberá estar basada en lecturas sistemáticas - de los niveles piezométricos, realizadas, según el caso, en estaciones piezométricas o en pozos de observación instalados ex-profeso y en lecturas de los niveles estático y dinámico de los pozos en la zona.

Las observaciones deberán llevarse a cabo con frecuencia bimestral, salvo casos especiales que requieran frecuencia mensual. Estas lecturas deberán efectuarse sistemáticamente, requiriéndose para los estudios específicos, las lecturas de un año completo como mínimo.

Es indispensable llevar un registro contínuo de estas lecturas -

para verificar el comportamiento de los acuíferos.

9.- Obtención de los coeficientes de transmisibilidad y almacenaje de los acuíferos.

Esta información deberá obtenerse a partir de pruebas de bombeo específicas, realizadas en pozos convenientemente distribuídos en la zona.

10.- Geoquímica de las aguas subterráneas.

Anualmente se tomarán muestras de las aguas subterráneas en los aprovechamientos existentes; se analizarán y se efectuará la interpretación geoquímica correspondiente.

Estas determinaciones representan un valioso auxiliar para el estudio del flujo subterráneo y proporcionan información completa respecto a la calidad de las aguas.

c.- CALCULO DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA

Un estudio tendiente a determinar la cuantía de los recursos de agua subterránea en una zona determinada, consta de tres etapas fundamentales:

Primera etapa.- Informe evaluativo preliminar

Este informe contendrá la apreciación de los recursos de agua subterránea en la zona en estudio, calculados con base en los datos dispo-

nibles. De acuerdo con los resultados obtenidos, se podrá juzgar acerca de la importancia relativa de los recursos y se podrá estudiar la conveniencia de efectuar un estudio más preciso, mediante la ampliación de las investigaciones y la instalación de los dispositivos indispensables para obtener los datos básicos necesarios.

Para la evaluación preliminar se sugiere alguno de los siguientes métodos, de acuerdo con la clase y calidad de los datos disponibles.

1.- Aplicación de coeficientes empíricos de infiltración en las diversas formaciones geológicas que afloran en la zona.

Este método requiere disponer de un plano de isoyetas medias confiable y de un plano geológico razonablemente bueno, determinando mediante exploraciones de campo, las condiciones hidrogeológicas generales, tales como permeabilidad superficial relativa de acuerdo con el estado de fracturamiento y conservación de las formaciones; probable extensión y tipo de los acuíferos, etc.

Se obtienen resultados necesariamente toscos y es aplicable, solamente, como una primera aproximación.

2.- Mediante la ecuación del balance hidrológico, denominado también método del déficit de escurrimiento.

Es aplicable cuando los datos climatológicos y los hidrométricos son suficientemente amplios y confiables y la explotación artificial de los

acuíferos mediante pozos es reducida. Requiere una estimación razonablemente buena de la evapotranspiración, lo cual acarrea la necesidad de tener buena información respecto a las profundidades del nivel freático y a los usos consuntivos en la zona.

El punto débil de este método reside en el hecho de que el cálculo de la evapotranspiración real adolece, comúnmente, de errores del mismo orden de magnitud de la infiltración y por lo general se desconocen las entradas y salidas del agua subterránea, desde y hacia zonas vecinas.

3.- Mediante el análisis de las curvas de decaimiento de caudales en las corrientes superficiales y en los manantiales.

Este método requiere un buen registro hidrométrico durante un lapso de varios años, especialmente durante los meses de estiaje, y un conocimiento adecuado de la profundidad de los niveles freáticos para estimar la evapotranspiración real a costa del almacenamiento subterráneo.

Este método proporciona una buena aproximación preliminar, especialmente para zonas donde la explotación de aguas subterráneas mediante pozos es pequeña en comparación con los recursos.

Segunda etapa.- Estudio de viabilidad del aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Si la importancia de los recursos en agua subterránea lo amerita, de acuerdo con los resultados obtenidos con el informe evaluativo preliminar, se pasará a la segunda etapa tendiente a calcular con mayor precisión la verdadera cuantía de los recursos, tanto por lo que respecta al rendimiento perenne como al volumen aprovechable eventualmente explotando el almacenamiento subterráneo, a fin de efectuar los anteproyectos de obras tendientes a aprovechar esos recursos. Para ésto, se requiere ampliar la información disponible mediante la instalación de los dispositivos necesarios para obtener los datos básicos, o sea:

1.- Instalar el número de estaciones climatológicas que resulte necesario para que la información sea más completa.

2.- Instalar estaciones hidrométricas adicionales, en los lugares convenientes de las corrientes superficiales y manantiales para obtener una información más completa.

3.- Formar el catálogo completo de los aprovechamientos de aguas subterráneas, anotando sus características constructivas y recabar datos de su comportamiento, estableciendo un sistema hidrométrico contínuo.

4.- Instalar estaciones piezométricas o pozos de observación, según el caso, en número suficiente y ubicadas adecuadamente para conocer

mejor el régimen piezométrico de la región. Deberá establecerse un servicio contínuo de lecturas piezométricas que incluya la medida de niveles estáticos y dinámicos en los pozos de la región.

5.- Efectuar pruebas de bombeo en el mayor número posible de pozos para determinar los coeficientes de transmisibilidad y almacenaje.

6.- Realizar un muestreo de las aguas en todas las captaciones de aguas subterráneas para su análisis físico-químico y su interpretación geoquímica. Asimismo, se harán los análisis bacteriológicos necesarios.

7.- Efectuar el censo demográfico, industrial y agrícola, con objeto de calcular las necesidades actuales de agua y efectuar su proyección a un futuro razonable.

8.- Con los datos anteriores, se calculará la cuantía de los recursos de agua subterránea, tanto los perennes como los que resulte aconsejable explotar del almacenamiento subterráneo, a fin de proyectar su distribución en la zona y la eventual exportación de los sobrantes. En esto convendrá tomar un margen de seguridad cuyo monto dependerá de la cantidad y calidad de los datos que sirvieron de base para efectuar los cálculos.

9.- Se harán los anteproyectos de obras y se calculará su costo, así como el de las obras de restitución, realizando a continuación los estudios de viabilidad económica.

Tercera etapa.- Proyecto definitivo para el aprovechamiento de los recursos de agua subterránea.

Cuando los estudios de viabilidad señalen la conveniencia económica de aprovechar los recursos de agua subterránea disponibles, se procederá a efectuar un estudio geohidrológico exhaustivo. Para ésto, se procederá en la siguiente forma:

1.- Formación definitiva del plano fotohidrogeológico de la zona, con las exploraciones necesarias.

2.- Configuración del fondo del acuífero aplicando métodos gravimétricos apoyados en perforaciones profundas y con el auxilio de líneas sísmicas convenientemente elegidas.

3.- Formación de los planos de geología subterránea, mediante la correlación de cortes geológicos y registros eléctricos con los resultados de las exploraciones geofísicas.

4.- Instalación de las estaciones climatológicas que resulten necesarias para obtener un conocimiento completo del régimen climatológico en la zona.

5.- Instalación de las estaciones piezométricas o pozos de observación adicionales que resulten necesarios, a fin de tener un conocimiento completo del régimen piezométrico de los acuíferos.

6.- Efectuar las pruebas de bombeo formales que resulten necesarias y pruebas de bombeo sencillas en todos los pozos existentes, a fin de tener un conocimiento completo de las propiedades físicas de los acuíferos.

7.- Formación de planos de los acuíferos, con sus propiedades físicas, en base a los datos de geología subterránea complementada con sondeos geoeléctricos y teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de bombeo.

8.- Formación y análisis de las redes de flujo construídas con base en las lecturas piezométricas.

9.- Establecimiento de las ecuaciones de equilibrio dinámico en los acuíferos con objeto de determinar la cuantía de los recursos de agua subterránea.

10.- Determinación de los efectos secundarios que pueden derivarse de la explotación de las aguas subterráneas, tales como hundimientos de la superficie del suelo o la intrusión de aguas saladas.

11.- Construcción de un modelo eléctrico representativo de las condiciones físicas e hidrogeológicas de la zona.

12.- Formulación de las posibles soluciones alternativas para la explotación de los recursos de agua subterránea para su estudio en el modelo y para los estudios ingenieriles.

13.- Continuación de los estudios geoquímicos.

14.- Formulación de las implicaciones hidrológicas y de los - efectos secundarios que pueden derivarse del esquema de explotación - elegido.

15.- Programación de la supervisión y de las observaciones continuas que deberán llevarse a cabo en el futuro.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

PRIMERA.- La fotointerpretación para fines hidrogeológicos - puede ser una herramienta muy útil para llegar a obtener una visión de conjunto de las condiciones hidrogeológicas en una cuenca dada.

SEGUNDA.- Los acuíferos de mayor importancia están formados por algunas capas de toba lacustre (confinados) y los basaltos jóvenes (libres y confinados).

TERCERA.- En el Valle de Toluca la zona de recarga más importante la constituyen los piroclásticos que rodean al Nevado y su dirección de flujo es en general Oeste-Este.

CUARTA.- En el Valle de Ixtlahuaca la zona de recarga principal son los basaltos jóvenes del Jocotitlán con una dirección general - de flujo Este-Oeste.

QUINTA.- En los dos valles se pierde una cantidad muy considerable de agua subterránea por evaporación, siendo en mayor escala en el Valle de Toluca.

SEXTA.- El Estrechamiento de Perales se considera como una - boquilla subterránea, y los efectos de la falla no se pueden precisar hasta no efectuarse las exploraciones que se requiere tener en esa zona.

SEPTIMA.- Este trabajo no pretende ser un estudio completo de la Fotohidrogeología, sino un primer intento de sistematización de criterios de interpretación de fotografías aéreas para fines hidrogeológicos.

RECOMENDACIONES

PRIMERA.- Se recomienda el empleo de los términos HIDROGEOLOGIA Y GEOHIDROLOGIA en la forma señalada en el primer capítulo.

SEGUNDA.- Es necesario realizar exploraciones geofísicas por el método de refracción en el Estrechamiento de Perales, éstos se pueden llevar a cabo en dos líneas paralelas de orientación Norte-Sur separadas 3 km, con una longitud no menor de 6 km, que deberán cortar en su parte media a la falla de Perales proyectada a la superficie.

Con el objeto de conocer la forma subterránea de la cuenca y el espesor de las tobas lacustres, se sugiere la exploración por el método geofísico ya indicado en líneas de orientación Este-Oeste y Norte-Sur, de tal suerte que se forme una cuadrícula que permita elaborar una configuración del fondo de los dos valles.

TERCERA.- Será necesaria la perforación de sondeos profundos, con el objeto de conocer el espesor de las tobas lacustres, su material que las constituye y el que forma su basamento.

En el Valle de Toluca se recomienda la perforación de un pozo profundo en los alrededores de San Antonio de la Isla, al NE de Zinacantepec, al Norte de San Pedro Cholula, al NE de Toluca, al Norte de Almoloya de Juárez, en Xonacatlán y hacia el centro del valle.

En el Estrechamiento de Perales se recomienda la perforación de un pozo sobre el bloque alto de la falla a 1 km al Sur de su proyección en la superficie y otro 2 km al Norte en el bloque bajo.

En el Valle de Ixtlahuaca se recomienda la perforación de un pozo aproximadamente a 1 km al NE de San Bartolo del Llano; uno al Norte de Santo Domingo de Guzmán, otro aproximadamente a 2 km al Este de San Pedro y al Sur de Atlacomulco.

CUARTA.- Debe hacerse la explotación de los acuíferos en tal forma que permita abatir su nivel piezométrico para evitar ó por lo menos reducir la pérdida por evaporación que existe actualmente.

QUINTA.- Se debe realizar un estudio Geohidrológico de acuerdo con el programa que se expuso en este trabajo que permita la explotación económica y racional de los recursos de agua subterránea.

BIBLIOGRAFIA

1.- CIA. SERVICIOS GEOLOGICOS, S.A. (1966). "Estudio Geohidrológico de la Cuenca Alta del Río Lerma hasta el Estrechamiento de Atlacomulco", para el Departamento del Distrito Federal.

2.- DICCIONARIO DE GEOLOGIA Y CIENCIAS AFINES. Editorial Labor. (1957). Tomo I y II.

3.- GUERRA PEÑA, FELIPE. (1961). "Las doce principales reglas de la Interpretación Fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan". Sobretiro del Anuario de Geografía, UNAM.

4.- GUERRA PEÑA, FELIPE. "Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México". Boletines 13-25.

5.- H. LAHEE. FREDERIC. (1958). "Geología Práctica". Ediciones Omega, S.A. En Español.

6.- J.M. DE WIEST, ROGER. (1965) "Geohydrology". Editado por John Wiley & Sons, Inc. En Inglés.

7.- L. TAMAYO, JORGE. (1962). "Geografía Moderna de México". Editorial F. Trillas. En Español.

8.- LUQUE, ALBERTO. "Cartografía del Estado de México". Editorial Escolar.

9.- MARTINEZ M. (1937). "Catálogo Plantas Mexicanas". Ediciones Botas. En Español.

10.- MOOSER, FEDERICO. (1961). "Informe sobre la geología de la Cuenca del Valle de México y zonas colindantes". S.R.H.

11.- N. DAVIS STANLEY y ROGER J.M. WIEST. (1966). "Hydrogeology". Editado por John Wiley & Sons, Inc. En Inglés.

12.- R. LUEDER. (1959). "Aerial Photographic Interpretation". McGraw-Hill Book Company, Inc. En Inglés.

13.- SAINZ ORTIZ, IGNACIO. (1966). "Programa para los estudios - Hidrogeológicos y Geohidrológicos". Secretaría de Recursos - Hidráulicos.

14.- SALDAÑA V. FRANCISCO. (1966). "Geografía de México". Editorial Esfinge. En Español.

15.- SANCHEZ MOLINA, ANTONIO. (1967). "Síntesis Geográfico de - México". Editorial F. Trillas. En Español.

ESTA TESIS SE IMPRIMIO EN JUNIO DE 1967
EMPLEANDO EL SISTEMA DE REPRODUCCION
XEROX-OFFSET EN LOS TALLERES DE
IMPRESOS OFFSALI-G, S. DE R. L.
MIER Y PESADO 329 COL. DEL VALLE MEXICO 12, D. F.
TEL. 23-21-05 Y 23-03-33