



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

CUANTIFICACION DE AGUA SUBTERRANEA

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
*INGENIERO CIVIL***

**P R E S E N T A:
JOSE LUIS CHAVEZ TORRES**

México, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

CUANTIFICACION DE
AGUA SUBTERRANEA

CONTENIDO.

I	INTRODUCCION.	1
	GENERALIDADES DISTRIBUCIÓN Y ORIGEN	
II	HIDROLOGIA SUPERFICIAL.	13
	CICLO HIDROLÓGICO PRECIPITACIÓN EVAPORACIÓN EVAPOTRANSPIRACIÓN INFILTRACIÓN ESCURRIMIENTO	
III	BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS.	54
	CONCEPTOS FUNDAMENTALES ECUACIÓN DE BALANCE	
IV	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.	71
	OBRAS CONSULTADAS.	79

CAPITULO I

INTRODUCCION

TEORICAMENTE EL VOLUMEN DE AGUA EN SUS TRES - ESTADOS: SÓLIDO, LÍQUIDO Y GASEOSO, QUE EXISTE EN NUESTRO PLANETA, ES CASI EL MISMO DESDE LOS PRIMEROS TIEMPOS. SU DISTRIBUCIÓN EN EL MUNDO HA SIDO ESTUDIADA POR DIVERSOS AUTORES, ESTIMÁNDOSE SU CANTIDAD DE LA SIGUIENTE MANERA:

VOLUMEN MUNDIAL DE AGUA SUPERFICIAL:

FUENTE:	VOLUMEN EN $m^3 \times 10^9$	PORCENTAJE:
AGUA DE MARES Y OCÉANOS	1'370,000,000	98,2519
HIELO POLAR Y NIEVE	24,000,000	1,7212
LAGOS DE AGUA DULCE	150,000	0,0108
LAGOS DE AGUA SALADA	130,000	0,0093
AGUA EN CORRIENTES	1,200	0,0001
AGUA CONSTITUTIVA DE SUELOS	80,000	0,0057
VAPOR ATMOSFÉRICO	14,000	0,0010

LA CANTIDAD TAN GRANDE DE AGUA DE MARES Y OCÉANOS UNIDA A LA DE HIELO POLAR Y NIEVE, ES PRÁCTICAMENTE INUTILIZABLE, UNA POR SER SALADA Y LA OTRA POR ESTAR EN LUGARES INACCESIBLES. EL AGUA DULCE DE LAGOS SE PODRÍA EMPLEAR EN PARTE, EL AGUA SALADA DE LOS LAGOS POR SU CONDICIÓN, QUEDA FUERA DE USO NORMAL.

EL AGUA EN CORRIENTES QUE REPRESENTA UN MÍNIMO DEL TOTAL, ES LA QUE MÁS SE UTILIZA, DEBIÉNDOSE PONER MAYOR ATENCIÓN EN SU CONSERVACIÓN POR LOS BENEFICIOS QUE PRODUCE SU EMPLEO, COMO SON ENTRE OTROS: CONSUMO HUMANO, RIEGO AGRÍCOLA, PROCESO INDUSTRIAL Y ACARREO DE DESECHOS.

EN CUANTO A LA EXPLOTACIÓN Y USO DEL AGUA DULCE, TANTO LA SUPERFICIAL COMO LA SUBTERRÁNEA, HA SIDO MUY IRREGULAR, PUES SE PRESENTA EL CASO MUY FRECUENTE DE GRANDES NÚCLEOS DE POBLACIÓN CONCENTRADOS A LAS ORILLAS DE RÍOS POCO CAUDALOSOS

O EN ZONAS SEMIDESÉRTICAS, EN CONTRASTE CON EL NULO APROVECHAMIENTO DE GRANDES CORRIENTES EN LA CERCANÍA DE LAS CUALES SE UBICAN ESCASOS CENTROS URBANOS CON BAJA POBLACIÓN.

UNA FUENTE MUY IMPORTANTE ES LA DEL AGUA SUBTERRÁNEA, CUYAS CIFRAS SON LAS SIGUIENTES:

AGUA SUBTERRÁNEA MUNDIAL.-

TOTAL EXPLOTABLE	$60 \times 10^9 \text{ M m}^3$
ZONAS DE ACTIVA PRODUCCIÓN	$4 \times 10^9 \text{ M m}^3$

AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA REPUBLICA MEXICANA.- QUE INVESTIGÓ EN 1975 LA ENTONCES SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS PARA EL APROVECHAMIENTO RACIONAL DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS.

TOTAL EXPLOTABLE	$255 \times 10^3 \text{ M m}^3/\text{ANUALES}$
APROVECHABLES	$28 \times 10^3 \text{ M m}^3/\text{ANUALES}$

LA ESTIMACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA ES APROXIMADA, SOBRE TODO LA APROVECHABLE, YA QUE SU CANTIDAD DEPENDE DE LA ZONA Y DE LA PROFUNDIDAD PROMEDIO DE LOS POZOS DE EXPLOTACIÓN.

AÚN CON ESTA CANTIDAD APROVECHABLE, $28 \times 10^3 \text{ M m}^3$ TAN BAJA EN RELACIÓN CON LA TOTAL, REPRESENTA UN VOLUMEN EXTREMADAMENTE GRANDE. PARA TENER IDEA DE ÉL, CONSIDÉRESE QUE SI TODA EL AGUA PARA USO POTABLE EN LA REPÚBLICA MEXICANA FUERA DE ORIGEN SUBTERRÁNEO, SE EMPLEARÍAN UNOS 7000 MILLONES DE METROS CÚBICOS AL AÑO, ES DECIR APENAS REPRESENTARÍA DE ÉSTE - EL 25%.

SOLAMENTE QUE DEBE CONSIDERARSE QUE NO EN TODOS LOS SITIOS SE PUEDE EXTRAER ESTA CLASE DE AGUA; HAY QUE TE

NER EN CUENTA LAS RESTRICCIONES QUE SE IMPONEN AL MANTENER EL - EQUILIBRIO ENTRE LA CANTIDAD LLOVIDA Y LA INFILTRADA, PARA EX-- TRAER COMO MÁXIMO LA QUE PUEDA PREVENIR UNA SOBRE EXPLOTACIÓN - QUE PRODUJERA RESULTADOS A VECES DE TIPO CATASTRÓFICO, TAMBIÉN DEBE TOMARSE EN CUENTA EL AGUA QUE SE EMPLEA EN RIEGO Y QUE RE-- PRESENTA UN VOLUMEN SUPERIOR AL DE CONSUMO HUMANO, DESDE EL PUN-- TO DE VISTA SOCIAL Y ECONÓMICO RESULTA IMPROPIO REGAR CON AGUAS SUBTERRÁNEAS PUES EN GENERAL ES AGUA DE CALIDAD POTABLE, OFRE-- CEN UN SUMINISTRO NATURAL MÁS PURO, ECONÓMICO Y SATISFACTORIO - QUE EL OBTENIDO A TRAVÉS DE AGUAS SUPERFICIALES, SIEMPRE Y CUAN-- DO SE CONSERVEN LAS AGUAS DISPONIBLES Y SE SUPLEMENTEN MEDIAN-- TE UNA RECARGA ADECUADA PROCEDENTE DE LOS RECURSOS SUPERFICIA-- LES,

SI NO SE ADMINISTRAN CUIDADOSAMENTE, FALLARÁN - EN CANTIDAD Y EN CALIDAD PUDIÉNDOSE DAR EL CASO DE QUE TENGAN - QUE SER ABANDONADAS.

CON EL CRECIENTE USO DE LOS RECURSOS DE LAS -- AGUAS SUBTERRÁNEAS, LA ADMINISTRACIÓN EFICAZ DE ÉSTAS ES UNA -- NECESIDAD ABSOLUTA. LA ADMINISTRACIÓN ADECUADA DEBE INCLUIR NO SÓLO LA CANTIDAD SINO TAMBIÉN LA CALIDAD. LA ADMINISTRACIÓN DE LA CANTIDAD CONSISTE EN UN CONTROL EFICAZ SOBRE LAS EXTRACCIO-- NES Y LA RECARGA. LA ADMINISTRACIÓN DE LA CALIDAD, QUE HASTA - HACE POCO NADIE TENÍA EN CUENTA, CONSISTE EN UN CONTROL EFICAZ SOBRE LA MINERALIZACIÓN DE LAS AGUAS FREÁTICAS COMO RESULTADO - DE LA ELIMINACIÓN DE DESECHOS, RECICLADO O AGUAS DE REABASTACE-- MIENTO DE MALA CALIDAD.

POR LO QUE SE REFIERE A LOS VOLÚMENES DE LAS - FUENTES DE APROVECHAMIENTO DE AGUA, EL 20% DEL AGUA QUE SE USA EN MÉXICO PROVIENE DEL SUBSUELO, EN ALEMANIA CERCA DEL 85% DEL AGUA QUE EMPLEA PROVIENE TAMBIÉN DEL SUBSUELO,

DISTRIBUCION Y ORIGEN.

UNA DE LAS CAUSAS QUE HAN PERMITIDO AL HOMBRE ESTABLECERSE EN FORMA PERMANENTE NO SÓLO EN LOS PAÍSES BIEN DOTADOS DE AGUA, SINO TAMBIÉN EN LAS ZONAS DESÉRTICAS, ES QUE EXISTEN POCAS ÁREAS EN LAS CUALES LAS PERFORACIONES, DEBIDAMENTE LOCALIZADAS NO ENCUENTREN CUANDO MENOS ALGO DE AGUA. EN UNA REGIÓN HÚMEDA LA PROFUNDIDAD DE UN POZO ADECUADO PUEDE SER DE SÓLO UNOS CUANTOS METROS; EN UN DESIERTO PUDE SER DE CIENTOS DE METROS. ÉSTOS HECHOS HAN SIDO DEMOSTRADOS POR LA EXPERIENCIA. EXISTE AGUA BAJO EL TERRENO, PRÁCTICAMENTE EN CUALQUIER LUGAR; PERO NO SIEMPRE CONSTITUYE UNA FUENTE DE ABASTECIMIENTO ADECUADA, PUES ÉSTO DEPENDE DE LA PROFUNDIDAD A QUE SE ENCUENTRE, DE LA CLASE DE ROCAS Y DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS EN EL AGUA. POR ESTA RAZÓN, ALGUNOS LUGARES SON MUCHO MÁS FAVORABLES QUE OTROS PARA OBTENER AGUA SUBTERRÁNEA.

RESPECTO A SU ORIGEN, LA IDEA DE QUE EL AGUA SUBTERRÁNEA SE DERIVA PRINCIPALMENTE DE LA LLUVIA Y LA NIEVE, LA TUVO UN ARQUITECTO ROMANO DE LOS TIEMPOS DE CRISTO, LLAMADO MARCUS VITRUVIUS, QUIEN ESCRIBIÓ UN TRATADO SOBRE ACUEDUCTOS Y ABASTECIMIENTO DE AGUA, ASUNTO DE GRAN IMPORTANCIA PRÁCTICA ENTRE LOS ROMANOS.

LA AFIRMACIÓN DE VITRUVIUS, AUNQUE ERA VERDADERA, FUE SOLAMENTE CUALITATIVA, NO FUE SINO HASTA EL SIGLO XVII QUE SE ESTABLECIÓ SOBRE SUS BASES CUANTITATIVAS. PIERRE PERRAULT FÍSICO FRANCÉS, LLEVÓ A CABO LA PRIMERA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA AL MEDIR LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y EL ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL SOBRE UNA PARTE DE LA CUENCA DEL SENA EN EL ORIENTE DE FRANCIA; HABIENDO ESTIMADO LA SUPERFICIE DE LA REGIÓN -- CONSIDERADA, CALCULÓ QUE EL ESCURRIMIENTO REPRESENTABA APENAS APROXIMADAMENTE EL 16% DEL AGUA RECIBIDA POR ESA REGIÓN EN FORMA DE LLUVIA Y DE NIEVE, DE LO CUAL CONCLUYÓ QUE LA DIFERENCIA,

EL 84% ERA MÁS QUE SUFICIENTE PARA EXPLICAR LA CANTIDAD DE AGUA EXISTENTE EN EL SUBSUELO. AUNQUE ACTUALMENTE SE SABE QUE GRAN PARTE DE ESA DIFERENCIA SE PIERDE POR EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN, EL RAZONAMIENTO DE PERRAULT FUE ACERTADO. SU TRABAJO DEMOSTRÓ QUE LA PRECIPITACIÓN ORIGINA EL AGUA SUBTERRÁNEA, EXCEPTO UNA PEQUEÑA PROPORCIÓN QUE ES JUVENIL, Y PROVIENE DE SUSTANCIAS QUE SE ENCUENTRAN EN EL INTERIOR DE LA TIERRA.

MUCHOS CONOCIMIENTOS ACERCA DEL AGUA SUBTERRÁNEA SE HAN ADQUIRIDO LENTAMENTE MEDIANTE LA EXPERIENCIA DE NUMEROSAS GENERACIONES QUE HAN PERFORADO MILLONES DE POZOS. ESTA EXPERIENCIA NOS ENSEÑA QUE UNA PERFORACIÓN DEL TERRENO GENERALMENTE ATRAVIESA PRIMERO POR UNA ZONA DE AIREACIÓN, QUE ES LA ZONA EN LA CUAL TODOS LOS ESPACIOS ABIERTOS DEL SUBSUELO SE ENCUENTRAN LLENOS PRINCIPALMENTE DE AIRE. A CONTINUACIÓN SIGUE LA ZONA DE SATURACIÓN QUE ES AQUELLA EN LA CUAL TODAS LAS ABERTURAS ESTAN LLENAS DE AGUA, ES EL AGUA SUBTERRÁNEA QUE SE DEFINE SENCILLAMENTE COMO EL AGUA QUE SE ENCUENTRA BAJO LA SUPERFICIE SÓLIDA DE LA TIERRA, (FIGURA 1).

EL NIVEL FREÁTICO ES EL QUE SE DEFINE COMO EL LUGAR GEOMÉTRICO DE PUNTOS DE AGUA QUE SOPORTAN UNA PRESIÓN IGUAL A LA ATMOSFÉRICA. CUALQUIER PUNTO SITUADO POR DEBAJO DE ESTE NIVEL O SUPERFICIE, ESTARÁ SOMETIDO A LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA MÁS EL PESO DE LA COLUMNA DE AGUA SUBTERRÁNEA QUE DESCANSA SOBRE ÉL. FINALMENTE PUNTOS DE AGUA SITUADOS POR ENCIMA DE LA SUPERFICIE FREÁTICA, ESTÁN AFECTADOS POR LAS FUERZAS CAPILARES Y POR TANTO LA PRESIÓN QUE SOPORTAN SE VERÁ DISMINUIDA POR ÉSTAS.

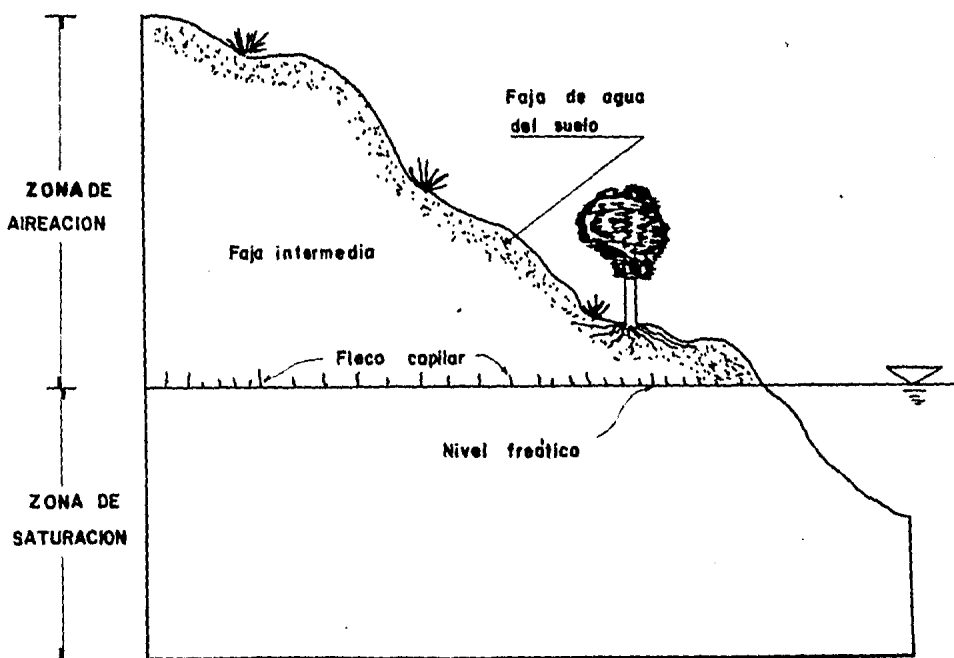


FIG. 1.- POSICIONES DE LA ZONA DE SATURACIÓN, NIVEL FREÁTICO Y ZONA DE AIREACIÓN.

ACUÍFEROS.- SE LLAMA ACUÍFERO A UN CUERPO DE -
ROCA O DE SEDIMENTO PERMEABLE A TRAVÉS DEL CUAL SE MUEVE EL ---
AGUA SUBTERRÁNEA. LOS CUERPOS DE GRAVA Y DE ARENA SON GENERAL--
MENTE BUENOS ACUÍFEROS; LA ARCILLA RARA VEZ LO ES. ASÍ MISMO MU
CHAS ARENISCAS TAMBIÉN SON ACUÍFEROS, AUNQUE POCO EFECTIVOS DE-
BIDO A LA PRESENCIA DE MATERIAL CEMENTANTE ENTRE SUS GRANOS.

PODRÍA PENSARSE QUE LAS LUTITAS, LAS ROCAS IG--
NEAS Y LAS METAMÓRFICAS, CON ESPACIOS EXTREMADAMENTE PEQUEÑOS -
ENTRE SUS GRANOS, DEBERÍAN SER IMPERMEABLES Y POR TANTO MALOS -
ACUÍFEROS, PERO NO SIEMPRE ES ASÍ. MUCHAS DE ESAS ROCAS SON --
PERMEABLES PORQUE TIENEN GRIETAS, FISURAS, ESPACIOS ENTRE LOS -
ESTRATOS Y OTRAS ABERTURAS BASTANTE GRANDES QUE SON CONTROLADAS

COMPLETAMENTE POR LA ATRACCIÓN MOLECULAR. SIN EMBARGO, SON ACUÍFEROS MENOS EFECTIVOS QUE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS DE GRANO GRUESO.

EN LA FIGURA 2 PODEMOS VER QUE EL NIVEL FREÁTICO ES UNA SUPERFICIE CON DIFERENTES INCLINACIONES. EN UNA REGIÓN DE LLUVÍAS ABUNDANTES DICHO NIVEL ES ALTO, BAJO LOS CERROS Y BAJO EN LOS VALLES, DE HECHO SIGUE EN FORMA MÁS SUAVE LAS ONDULACIONES DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO. (SIN EMBARGO, EN UNA REGIÓN SECA ES DIFERENTE, VÉASE LA FIGURA 5). EL AGUA PENETRA EN EL TERRENO POR INFILTRACIÓN DESDE LA SUPERFICIE Y ES ARRAS--TRADA POR LA GRAVEDAD HACIA EL NIVEL DE LA CORRIENTE DEL VALLE --MÁS CERCANO. EMERGE EN EL VALLE Y DESCARGA EN LA CORRIENTE.

DURANTE LAS TEMPORADAS DE SEQUÍA EL NIVEL FREÁTICO BAJA LENTAMENTE, PERO CON CADA LLUVÍA, LA NUEVA INFILTRACIÓN LO ELEVA OTRA VEZ, Y SU FORMA ENCORVADA BAJO CADA CERRO Ó CADA COLINA ES EL RESULTADO DIRECTO DE LA LENTA VELOCIDAD DEL FLUJO.

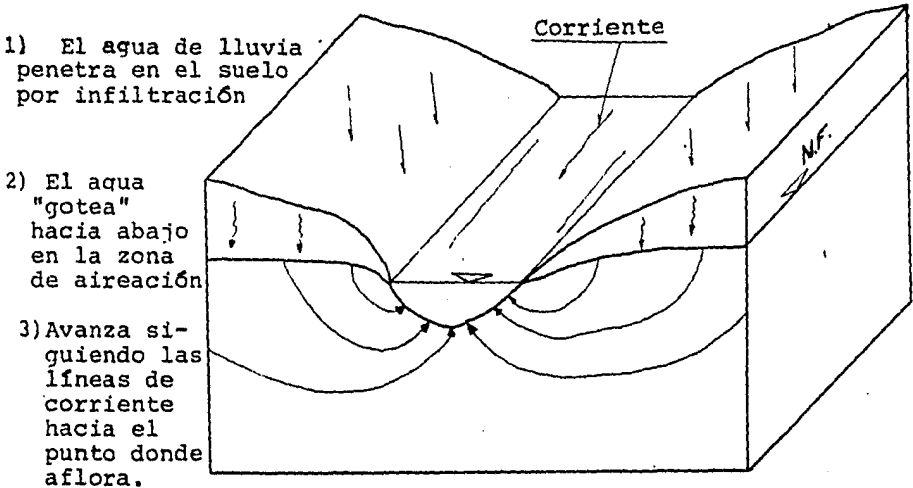


FIG. 2.- MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN UN MATERIAL UNIFORMEMENTE PERMEABLE.

POZO.- UN POZO ES UNA PERFORACIÓN VERTICAL, EN GENERAL DE FORMA CILÍNDRICA Y DE DIÁMETRO MUCHO MENOR QUE LA PROFUNDIDAD, EL AGUA PENETRA A LO LARGO DE LAS PAREDES DEL POZO CREANDO UN FLUJO DE TIPO RADIAL, ES EL TIPO DE CAPTACIÓN MÁS COMÚN.

AL EXTRAER AGUA DEL POZO, BAJA EL NIVEL Y SE CREA UN CONO DE DEPRESIÓN, QUE ES UN ABATIMIENTO CÓNICO DEL NIVEL FREÁTICO EN LA ZONA DEL POZO, (FIGURA 3),

LOS POZOS QUE SE BOMBEOAN CON FINES DE IRRIGACIÓN O PARA USOS INDUSTRIALES, SACAN TAL CANTIDAD DE AGUA QUE LA DEPRESIÓN PUEDE LLEGAR A SER MUY AMPLIA Y ACENTUADA HASTA EL PUNTO DE HACER DESCENDER EL NIVEL FREÁTICO EN TODOS LOS POZOS DE UNA COMARCA.

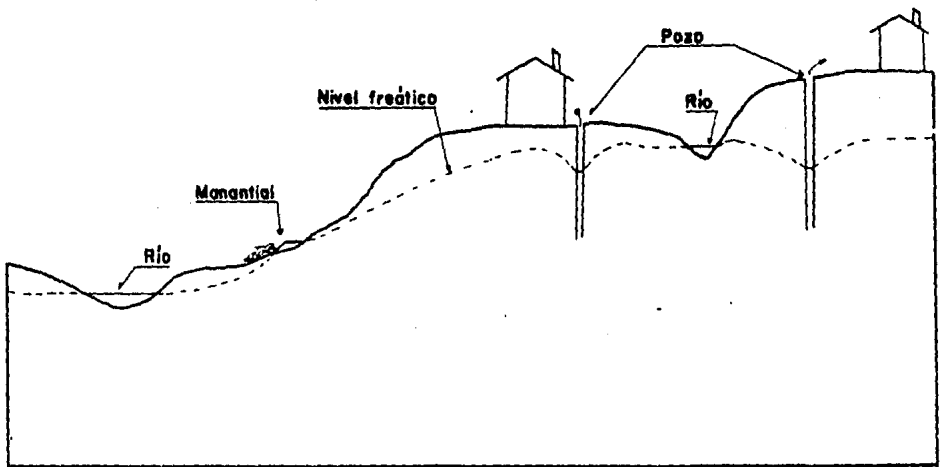


FIG. 3.- VARIACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO Y CONOS DE DEPRESIÓN.

MANANTIAL.- ES UN ESCURRIMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA QUE EMERGE A LA SUPERFICIE DE FORMA NATURAL, EL MÁS SIMPLE ES EL MANANTIAL ORDINARIO O DE GRAVEDAD CUYO FLUJO OBEDECE DIRECTAMENTE A LA FUERZA DE GRAVEDAD.

ALGUNAS VECES EL AGUA SUBTERRÁNEA SE HALLA EN UNA FORMACIÓN RECUBIERTA POR UN ESTRATO IMPERMEABLE FORMANDO ASÍ UN ACUÍFERO CONFINADO O ARTESIANO, COMO LO EJEMPLIFICA LA FIGURA 4, MOSTRANDO UNA SERIE DE ESTRATOS INCLINADOS QUE INCLUYEN UNA CAPA PERMEABLE TAL COMO UNA ARENISCA Y SOBRE ELLA OTRA IMPERMEABLE, - COMO POR EJEMPLO UNA LUTITA O ARCILLA, EL AGUA SUBTERRÁNEA PUEDE AFLORAR A TRAVÉS DE ESTA ÚLTIMA, LA CUAL VIENE A SER POR DEFINICIÓN UN ACUÍFERO. EN EL ÁREA DE ENTRADA DE AGUA, EN DONDE LA ARENISCA ESTA CORTADA POR LA SUPERFICIE DEL TERRENO, EL AGUA PENE-- TRA EN EL ACUÍFERO POR LA LUTITA IMPERMEABLE, LA CUAL CONSTITUYE UN TECHO Y ADEMÁS, IMPIDE EL ESCAPE TANTO A LOS LADOS COMO HACIA ABAJO PERO LA LUTITA MISMA ESTÁ SATURADA Y TODO EL SISTEMA QUEDA BAJO EL NIVEL PIEZOMÉTRICO. EN EL ÁREA DE ENTRADA DE AGUA, EN -- DONDE LA ARENISCA ESTA CORTADA POR LA SUPERFICIE DEL TERRENO, EL AGUA PENETRA EN EL ACUÍFERO Y FLUYE SIGUIENDO SU INCLINACIÓN. EL FLUJO QUEDA CONFINADO DENTRO DEL ACUÍFERO POR LA LUTITA IMPERMEABLE.

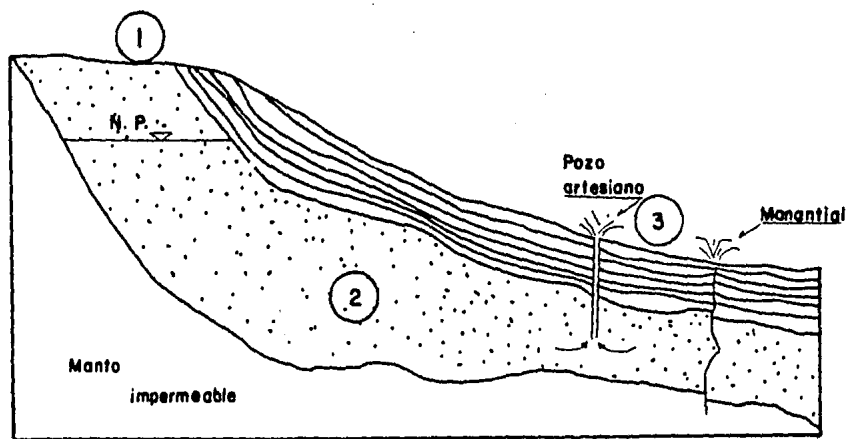


FIG. 4.- CONDICIONES ESENCIALES DE LOS POZOS ARTESIANOS.
 1).- EL AGUA PENETRA EN EL ACUÍFERO EN EL ÁREA DE CAPTACIÓN,
 2).- FLUYE A TRAVÉS DEL ACUÍFERO.
 3).- SALE A TRAVÉS DE LOS POZOS Y MANANTIALES.

EL ACUÍFERO ES COMO UNA TUBERÍA O UN CONDUCTO -- AMPLIO, PLANO, LLENO DE MATERIAL PERMEABLE QUE MANTIENE SU AGUA SUBTERRÁNEA CONFINADA BAJO LA PRESIÓN DE LA COLUMNA DE AGUA QUE SE EXTIENDE HASTA SU EXTREMO SUPERIOR POR ENCIMA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO Y AL PESO DE LA SOBRECARGA, LOS POZOS QUE ATRAVIESAN LA CAPA DE TECHO Y PENETRAN EN EL ACUÍFERO LIBERAN DE LA PRE-- SIÓN AL AGUA, LA CUAL SE ELEVA EN CADA POZO HASTA EL NIVEL DE - ADMISIÓN O ENTRADA, EXCEPTO UNA CIERTA CANTIDAD QUE NO SUBE DE-- BIDO A LA PÉRDIDA DE ENERGÍA POR LA FRICCIÓN PROVOCADA POR EL - FLUJO, LUEGO ENTONCES LA ALTURA A LA CUAL PUEDE ELEVARSE EL --- AGUA DE UN POZO CUALQUIERA DEPENDE DE LA DISTANCIA EN RELACIÓN AL PUNTO DE ADMISIÓN DEL AGUA, DE LA ALTURA DE DICHO LUGAR SO-- BRE LA CABEZA DEL POZO Y DE LA PERMEABILIDAD DEL ACUÍFERO. EN - ESTE CASO DEFINIMOS UN POZO ARTESIANO COMO UN POZO CUYA AGUA SE ELEVA POR ENCIMA DEL ACUÍFERO, EL NOMBRE PROVIENE DE LA PROVIN- CIA FRANCESA DE ARTOIS, CERCA DE CALAIS, EN LA CUAL SE PERFORÓ EL PRIMER POZO DE ESTA CLASE EN EUROPA, CUANDO LOS FACTORES AN- TES MENCIONADOS SON EXCEPCIONALMENTE FAVORABLES, LA PRESIÓN -- PUEDE SER BASTANTE GRANDE COMO PARA ELEVAR EL AGUA POR ENCIMA - DEL NIVEL DEL TERRENO, FORMANDO FUENTES DE 60 Ó 70 METROS DE -- ALTURA.

LA ADICIÓN DE AGUA A LA ZONA DE SATURACIÓN SE - CONOCE CON EL NOMBRE DE RECARGA, YA SEA QUE SE TRATE DE UN SIS- TEMA GRAVITACIONAL O UN SISTEMA ARTESIANO, EN UNA REGIÓN ÁRIDA ATRAVESADA POR CORRIENTES QUE SON ALIMENTADAS DESDE LAS MONTA- ÑAS DE OTRAS ÁREAS LLUVIOSAS, EL NIVEL FREÁTICO SE ENCUENTRA - BASTANTE ABAJO DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO; EN TAL SITUACIÓN, LA RECARGA TIENE LUGAR A PARTIR DE LA CORRIENTE MISMA POR IN-- FILTRACIÓN (FIGURA 5),

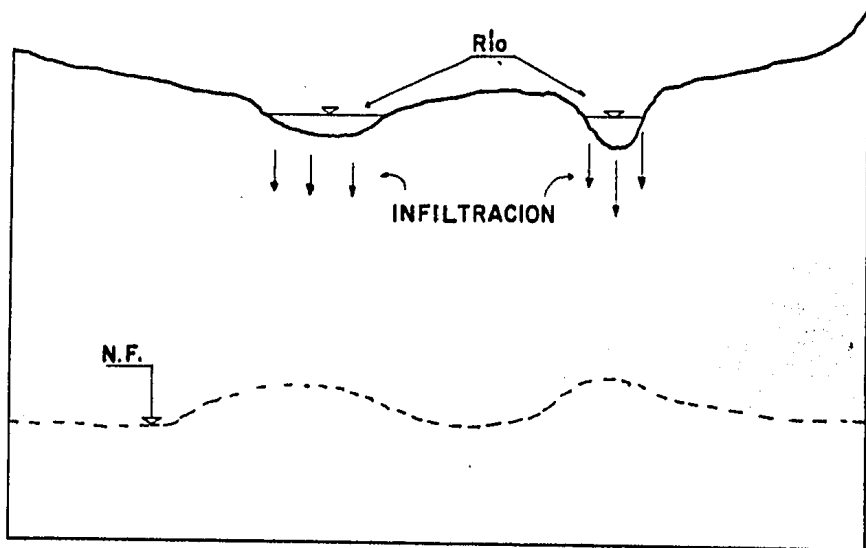


FIG. 5.- RECARGA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA REGIÓN SECA POR - INFILTRACIÓN DESDE CORRIENTES CUYAS FUENTES SE EN--- CUENTRAN EN LAS MONTAÑAS CON ABUNDANTE PRECIPITACIÓN.

TODAS LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS CONTIENEN SUSTAN-- CIAS EN SOLUCIÓN. SU CAPACIDAD PARA DISOLVER Y PARA OXIDAR DE-- PENDE DE SU CONTENIDO DE BIÓXIDO DE CARBONO Y ÓXIGENO LIBRE AL PENETRAR EN LA ZONA DE AEREAACIÓN. EL AGUA DE LLUVIA CONTIENE A AMBOS ADQUIRIDOS DE LA ATMÓSFERA Y CUANDO PASA A TRAVÉS DEL -- SUELO ADQUIERE MÁS BIÓXIDO DE CARBONO GENERADO POR LAS BACTE--- RIAS. ASÍ PUES, EN LA PARTE SUPERIOR DE LA ZONA DE AEREAACIÓN, - EL AGUA SUBTERRÁNEA ES ESENCIALMENTE UN ÁCIDO CARBÓNICO MUY DI- LUÍDO, UNA SUSTANCIA CORROSIVA Y UN SOLVENTE EFICAZ.

LA COMPOSICIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA VARÍA DE UN LUGAR A OTRO DE ACUERDO CON LA CLASE DE ROCA EN LA QUE SE EN--- CUENTRA.

ALGUNAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SON SALADAS, EXISTEN DOS RAZONES: A LO LARGO DE ALGUNAS COSTAS EL AGUA SUBTERRÁNEA - SE CONTAMINA POR INFILTRACIÓN DE AGUA MARINA. EN CIERTAS ROCAS-SEDIMENTARIAS PROFUNDAS, EL AGUA SUBTERRÁNEA SALOBRE ES AGUA -- CONNATA QUE VIENE A SER AGUA DE MAR QUE QUEDÓ ATRAPADA EN LAS RQ CAS SEDIMENTARIAS CUANDO ÉSTAS SE DEPOSITARON COMO SEDIMENTO, -- HABIENDO PERMANECIDO AHÍ DESDE ENTONCES.

CAPITULO II

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

CICLO HIDROLOGICO.-

EL CICLO HIDROLÓGICO ES UN TÉRMINO DESCRIPTIVO APLICABLE A LA CIRCULACIÓN GENERAL DEL AGUA. ESTE CICLO PUEDE EMPEZAR CON LA EVAPORACIÓN DE LOS OCEANOS. EL VAPOR RESULTANTE ES TRANSPORTADO POR LAS MASAS DE AIRE EN MOVIMIENTO. EN DETERMINADAS CONDICIONES, EL VAPOR SE CONDENSA FORMANDO NUBES QUE, A SU VEZ, PUEDEN OCASIONAR PRECIPITACIONES. DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE EL TERRENO, UNA PARTE ES RETENIDA POR LA SUPERFICIE, OTRA ESCURRE SOBRE ELLA Y LA RESTANTE PENETRA EN EL SUELO. (FIGURA 6).

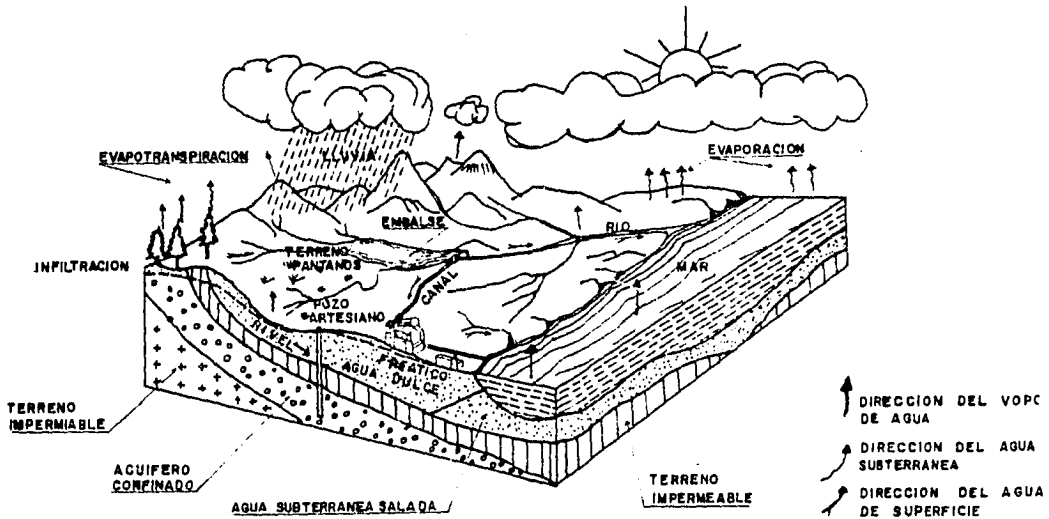


FIG. 6.- CICLO HIDROLÓGICO.

EL AGUA RETENIDA ES DEVUELTA A LA ATMÓSFERA -- POR EVAPORACIÓN Y POR LA TRANSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS. LA PARTE QUE ESCURRE SOBRE LA SUPERFICIE ES DRENADA POR ARROYOS Y RÍOS -- HASTA EL OCEANO; AUNQUE PARTE SE PIERDE POR EVAPORACIÓN. EL -- AGUA QUE SE INFILTRA SATISFACE LA HUMEDAD DEL SUELO Y ABASTECE LOS DEPÓSITOS SUBTERRÁNEOS, DE DONDE PUEDE FLUIR HACIA LAS CORRIENTES DE LOS RÍOS, O BIEN DESCARGAR EN LOS OCEANOS; LA QUE QUEDA EN LA CAPA VEGETAL DEL SUELO ES REGRESADA A LA ATMÓSFERA

POR TRANSPIRACIÓN.

ESTA DESCRIPCIÓN SIMPLIFICADA DEL CICLO HIDROLÓGICO ES DE TIPO CUALITATIVO Y EN ELLA NO SE HA INCLUIDO EL -- TIEMPO, POR EJEMPLO, DESPUÉS DE OCURRIDA UNA TORMENTA, EL EFECTO INMEDIATO EN UN RÍO ES DEJAR SENTIR POR EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, ADEMÁS DE EXISTIR RECARGA DEL AGUA SUBTERRÁNEA. PUEDE DECIRSE TAMBIÉN QUE NO HAY EVAPORACIÓN DURANTE LA TORMENTA, Y QUE TODA EL AGUA DE LLUVIA SE INTERCEPTA, INFILTRA Y ESCURRE SUPERFICIALMENTE.

SE DENOMINA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA A LA INSTALACIÓN QUE PERMITE MEDIR PRECIPITACIONES, EVAPORACIONES, TEMPERATURAS Y VIENTO. EXISTEN INSTRUCTIVOS ELABORADOS POR ALGUNA -- SECRETARÍA DE ESTADO QUE DESCRIBEN LOS INSTRUMENTOS EMPLEADOS - EN LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS, SU OPERACIÓN Y EL PROCEDIMIENTO DE REGISTRO DE DATOS.

PRECIPITACION.-

LA PRECIPITACIÓN ES UNA COMPONENTE FUNDAMENTAL DEL CICLO HIDROLÓGICO Y SE HA TOMADO COMO EL INICIO DEL ANÁLISIS DE DICHAS COMPONENTES. EL COMPORTAMIENTO DE FENÓMENOS TALES COMO TEMPERATURA, VIENTO, PRESIÓN, PRECIPITACIÓN, ETC., EN UN -- DETERMINADO LUGAR Y POR UN CIERTO TIEMPO SE LLAMA CLIMA.

CUANDO EL AGUA, EN ESTADO LÍQUIDO Ó SÓLIDO -- LLEGA A LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, SE DICE QUE SE HA PRECIPITADO.

PARA MEDIR LA TEMPERATURA DEL AIRE SE UTILIZA EL TERMÓMETRO, EL CUAL DEBE COLOCARSE EN CONDICIONES TALES QUE PERMITAN LA LIBRE CIRCULACIÓN DEL AIRE A SU ALREDEDOR Y, ADEMÁS PROTEGERSE DE LA EXPOSICIÓN DIRECTA DE LOS RAYOS SOLARES Y DE LA PRECIPITACIÓN. PARA UNIFORMAR LAS CONDICIONES DE INSTA-

LACIÓN DEL TERMÓMETRO, SE UTILIZAN CASETAS DE MADERA, DENTRO -- DE ÉSTAS SE COLOCA UN TERMÓMETRO DE MÁXIMA Y MÍNIMA, CON EL --- CUAL SE HACEN LECTURAS DIARIAS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA, MÍNIMA Y AMBIENTE` EN OCASIONES SE UTILIZA UN TERMÓMETRO (DENOMINADO - SEGÚN SU USO) PARA CADA UNA DE LAS TEMPERATURAS CITADAS. (SE -- PUEDE EMPLEAR UN TERMÓGRAFO, EL CUAL REGISTRA AUTOMÁTICAMENTE - LA TEMPERATURA DURANTE TODO EL DÍA, POR SUPUESTO, ESTE APARATO - PROPORCIONA MAYOR INFORMACIÓN QUE LAS ANTERIORES),

EL VIENTO, QUE ES EL AIRE EN MOVIMIENTO, ES UN FACTOR IMPORTANTE EN LA EVAPORACIÓN Y EN LA PRECIPITACIÓN. PARA DETERMINAR SU DIRECCIÓN, DE ACUERDO CON LOS PUNTOS DE LA ROSA - DE LOS VIENTOS, SE UTILIZA LA VELETA, ESTA SE SITÚA A CUATRO METROS SOBRE EL NIVEL DEL SUELO.

PARA MEDIR LA VELOCIDAD DEL VIENTO SE EMPLEA - EL ANEMÓMETRO DE COPAS O HÉLICE, EL CUAL REGISTRA EL NÚMERO DE - REVOLUCIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO. TAMBIÉN SE USA EL - ANEMÓMETRO DE TUBO, EL CUAL FUNCIONA CON EL PRINCIPIO DEL TUBO - DE PITOT. COMO LA VELOCIDAD DEL VIENTO VARÍA CON LA ALTURA SO-- BRE EL TERRENO, SE HACEN AJUSTES APROXIMADOS PARA DIFERENTES -- ALTURAS, EMPLEANDO LA FÓRMULA EMPÍRICA.

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^k$$

V , - VELOCIDAD DEL VIENTO A LA ALTURA Z SOBRE EL TERRENO.

V₀ , - VELOCIDAD DEL VIENTO AL NIVEL DEL ANEMÓMETRO Z₀

k , - ES UNA CONSTANTE CON UN VALOR PRÓXIMO A 1/7

EL VAPOR DE AGUA CONTENIDO EN LA MASA DE AIRE, A CONSECUENCIA DE LOS CAMBIOS DE PRESIÓN, TEMPERATURA Y DEL MO- VIMIENTO DE ESTAS MASAS, AYUDADO, EN OCASIONES POR MINÚSCULOS - NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN Y MATERIAL SÓLIDO EN SUSPENSIÓN, SE REU- NE EN GOTAS DE AGUA O EN CRISTALES DE HIELO Y CAE VENCENDO LAS

RESISTENCIAS QUE SE LE OPONEN, HASTA LLEGAR A LA SUPERFICIE TERRESTRE.

A VECES SE TRATA DE UNA SIMPLE CONDENSACIÓN - DEL VAPOR DE AGUA QUE RODEA UN CUERPO MÁS FRÍO, Y LA PRECIPITACIÓN SE LLAMA ROCÍO CUANDO LA TEMPERATURA ES SUPERIOR A 0°C , - O ESCARCHA SI EL FENÓMENO OCURRE A TEMPERATURA 0°C .

LAS GOTAS DE LLUVIA SON HASTA 10^6 VECES MÁS - GRANDES QUE LOS CORPÚSCULOS DE AGUA DEL AEROSOL QUE CONSTITUYEN LAS NUBES, ESTANDO SU DIÁMETRO MEDIO COMPRENDIDO ENTRE 0.5 mm Y 2.5 mm .

SI EL DIÁMETRO MEDIO DE LAS GOTAS ES INFERIOR A 0.5 mm LA PRECIPITACIÓN SE LLAMA LLOVIZNA, LA PRECIPITACIÓN SÓLIDA AMORFA ES EL GRANIZO Y CRISTALIZADA LA NIEVE.

LA PRECIPITACIÓN ES UN FENÓMENO DE TIPO DISCONTÍNUO Y POR ESO NO SE PUEDE HABLAR DE SU VARIACIÓN DIARIA O ANUAL DEL MISMO MODO QUE SE HA HECHO PARA OTROS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS. SU DISTRIBUCIÓN EN EL ESPACIO TANTO COMO EN EL TIEMPO ES SUMAMENTE VARIABLE.

SEGÚN LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS QUE LAS -- ORIGINAN, O LAS ACOMPAÑAN, HAY TRES TIPOS DE PRECIPITACIONES.

A).- PRECIPITACIÓN CONVECTIVA, ORIGINADA POR EL CALENTAMIENTO DE LAS MASAS DE AIRE PRÓXIMAS A LA SUPERFICIE DE UN SUELO QUE HA RECIBIDO UNA FUERTE INSOLACIÓN. SUELEN SER TORMENTAS LOCALES PROPIAS DE LA ESTACIÓN CÁLIDA.

B).- PRECIPITACIÓN FRONTAL O CICLÓNICA, CON ORIGEN EN LAS SUPERFICIES DE CONTACTO DE MASAS DE AIRE (FRENTE) CON TEMPERATURA Y HUMEDAD DIFERENTES. PUEDEN SER DE FRENTE CÁLIDO O FRÍO, O BIEN ESTAR ORIGINADAS POR OCLUSIÓN DE UN -- FRENTE.

c).- PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA O LLUVIA DE RELIEVE, PROPIAS DE ZONAS MONTAÑOSAS, POR EL ENFRIAMIENTO Y CONSIGUIENTE CON DENSACIÓN DE VAPOR DE AGUA EN LAS MASAS DE AIRE QUE AL TROPEZAR CON UNA LADERA ASCIENDEN POR ELLA.

NO OBSTANTE, HAY QUE ACLARAR QUE, EN GENERAL, - LAS PRECIPITACIONES ESTARAN ORIGINADAS POR COMBINACIONES DE DOS DE LOS TIPOS ANTERIORES O DE LOS TRES.

ANÁLISIS DE DATOS DE LLUVIA.-

A LOS CENTROS METEREOLÓGICOS, LLEGAN MENSUAL-- MENTE LAS TARJETAS QUE LLENAN LOS ENCARGADOS DE LECTURA DE LOS PLUVIÓMETROS, O EN SU CASO, LOS REGISTROS DE LOS PLUVIÓGRAFOS, REUNIÉNDOSE ASÍ LA INFORMACIÓN RELATIVA AL MES INMEDIATO PASA-- DO, Y QUE, EN GENERAL, ES UN CONJUNTO DE DATOS DE:

- PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL EN CADA PLUVIÓ-- METRO.
- PRECÍPITACIÓN EN UN INTERVALO DE 24 HORAS EN CADA PLUVIÓMETRO.
- PRECIPITACIÓN MÁXIMA MENSUAL EN 24 HORAS, EN CADA PLUVIÓMETRO.
- NÚMERO DE DÍAS DE LLUVIA, NIEVE O GRANIZO, - DURANTE EL MES EN CADA ESTACIÓN.
- REGISTROS DE PLUVIÓGRAFOS.

AL TRANSCURRIR EL TIEMPO, TODO ESTE CONJUNTO - ALCANZA UN VOLUMEN REALMENTE POCO MANEJABLE. POR ESO SE DEBE - ACUDIR A PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS QUE RACIONALICEN LA PRE-- SENTACIÓN, SINTETIZANDO EN UNOS POCOS ELEMENTOS (VALORES ME--- DIOS, DISPERSIÓN RESPECTO A ELLOS, FORMA DE LA CURVA DE OBSER-- VACIONES, ETC.), EL MÁXIMO DE INFORMACIÓN.

MÓDULO PLUVIOMÉTRICO ANUAL MEDIO, SE LLAMA --
ASÍ A LA MEDIA ARITMÉTICA DE LA LLUVIA ANUAL, DURANTE UNA SERIE
DE AÑOS. LA LLUVIA EN UN AÑO DIVIDIDA POR EL MÓDULO PLUVIOMÉTRI
CO ANUAL MEDIO, ES EL ÍNDICE DE HUMEDAD Y PERMITE CLASIFICAR
LOS AÑOS EN HÚMEDOS, MEDIOS O SECOS. NATURALMENTE, LA POSIBILI
DAD DE APROVECHAMIENTO DE ESA AGUA, DEPENDERÁ DE LA DISTRIBU---
CIÓN DE LA LLUVIA EN INTERVALOS MÁS CORTOS.

CUANDO LAS SERIES DISPONIBLES SEAN DE POCOS --
AÑOS (MENOS DE 30) EL MÓDULO PLUVIOMÉTRICO ANUAL DEBE TOMARSE -
CON MUCHA PREOCUPACIÓN PUES EN EL CONJUNTO ES POSIBLE QUE PREDO
MINEN AÑOS SECOS, O POR EL CONTRARIO AÑOS HÚMEDOS.

LLUVIA MEDIA MENSUAL, CON EL MISMO CRITERIO AN
TERIOR, PUEDEN CALCULARSE LAS MEDIAS DE LAS PRECIPITACIONES RE
CIBIDAS EN UN CIERTO MES, DURANTE UNA SERIE DE AÑOS. ESTE VALOR
ES LA LLUVIA MEDIA MENSUAL. LA SUMA DE LAS LLUVIAS MEDIAS MEN--
SUALES, DE TODOS LOS MESES DEL AÑO SERÁ IGUAL AL MÓDULO PLUVIO
MÉTRICO ANUAL MEDIO. SE TIENE ASÍ UNA DISTRIBUCIÓN DE ESE TOTAL
MEDIO A LO LARGO DEL AÑO.

LLUVIA DIARIA (CURVA MASA), CUANDO LA ESTACIÓN
PLUVIOMÉTRICA TIENE UN PLUVIÓMETRO ORDINARIO, GENERALMENTE SE -
HACE UNA MEDIDA AL DÍA. EN LAS REDES NACIONALES ESTA MEDIDA SE
HACE A LA MISMA HORA TODOS LOS DÍAS, A FIN DE HOMOGENEIZAR LOS
RESULTADOS.

EN OCASIONES, SE HACE MÁS DE UNA MEDIDA DIARIA,
Y SE TIENE ASÍ UNA IDEA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN ESAS
VEINTICUATRO HORAS. PERO SI SE PRECISA CONOCER DETALLADAMENTE -
ESTA DISTRIBUCIÓN ES NECESARIO INSTALAR UN PLUVIÓGRAFO. EL RE--
GISTRO DEL PLUVIÓGRAFO ES UNA CURVA DE LLUVIA ACUMULADA. DE ELLA
SE DEDUCE, EL TOTAL DE LLUVIA RECOGIDA Y LAS CANTIDADES RECIBI-
DAS EN INTERVALOS PARCIALES DE TIEMPO, TAN PEQUEÑOS COMO SE ---
QUIERA, ES DECIR LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA QUE SE EXPRESA EN, -

mm/hora. CUANDO EL INTERVALO ES INFINITÉSIMO SE TIENE INTENSIDAD INSTANTÁNEA.

PARA EL ESTUDIO HIDROLÓGICO DE UNA DETERMINADA EXTENSIÓN SUPERFICIAL DE TERRENO, ES PRECISO ESTIMAR A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS EN UNOS CUANTOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN, VALORES APLICABLES AL CONJUNTO DE LA ZONA.

EL PRIMER PASO ES REUNIR LOS DATOS BÁSICOS METEOROLÓGICOS Y COMPLETAR LAS SERIES HACIÉNDOLAS HOMOGÉNEAS EN TAMAÑO Y CALIDAD POR PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS.

LA HIPÓTESIS GENERAL ES CONSIDERAR APLICABLE LA MEDIDA OBTENIDA EN UN PUNTO A TODA UN ÁREA MÁS O MENOS EXTENSA SEGÚN LA DENSIDAD ESPACIAL DE LA RED DE OBSERVACIÓN. DETERMINAR ESTE DOMINIO PARA CADA ESTACIÓN ES UN PROBLEMA A RESOLVER EN CADA CASO PARTICULAR TENIENDO EN CUENTA LAS CARACTERÍSTICAS DEL FENÓMENO METEOROLÓGICO Y DE LA ZONA EN ESTUDIO.

SE CITAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS PROCEDIMIENTOS:

A).- MEDIA ARITMÉTICA.-

CONSISTE EN TOMAR COMO LLUVIA MEDIA A LA ZONA, LA MEDIA ARITMÉTICA DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS EN LOS PLUVIÓMETROS SITUADOS EN ELLA. LA APROXIMACIÓN ES ESCASA, PERO EL PROCEDIMIENTO PUEDE SER ÚTIL EN TRABAJOS PARA LOS QUE NO ES NECESARIA UNA GRAN EXACTITUD, SIEMPRE QUE LA ZONA REUNA CARACTERÍSTICAS SUFICIENTES DE HOMOGENEIDAD CLIMÁTICA Y FÍSICA, (FIGURA 7).

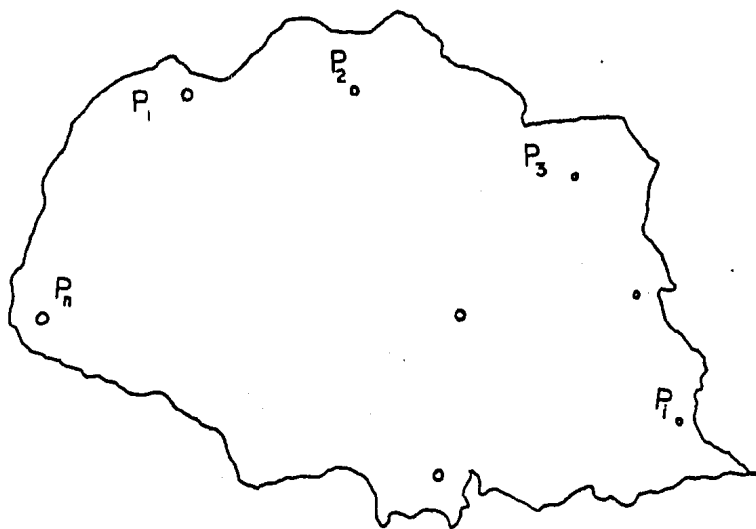


Fig. 7.- MEDIA ARITMETICA. (n PLUVIÓMETROS EN LA CUENCA).

SIENDO P_1, P_2, \dots, P_n , LA LLUVIA RECOGIDA POR LOS n PLUVIÓMETROS DE LA ZONA EN EL MISMO INTERVALO DE TIEMPO, LA LLUVIA MEDIA PARA LA ZONA ES:

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad - \quad (1)$$

B).- MÉTODO DE LOS POLÍGONOS DE THIESEN.-

ASIGNA COMO DOMINIO A CADA PLUVIÓMETRO UN POLÍGONO CONVEXO QUE LE RODEA. LOS POLÍGONOS SE DIBUJAN TRAZANDO SOBRE UN PLANO DE LA ZONA LAS MEDIATRICES DE LOS SEGMENTOS QUE UNEN EL PUNTO DE UBICACIÓN DEL PLUVIÓMETRO CONSIDERADO CON LOS DE UBICACIÓN DE LOS PLUVIÓMETROS MÁS PRÓXIMOS. EN LOS POLÍGONOS LIMÍTROFES SE CONSIDERARÁ SOLAMENTE EL ÁREA INTERIOR DE LA ZONA, PERO PARA SU DIBUJO PUEDEN TENERSE EN CUENTA PLUVIÓMETROS EXTERIORES, (FIGURA 8).

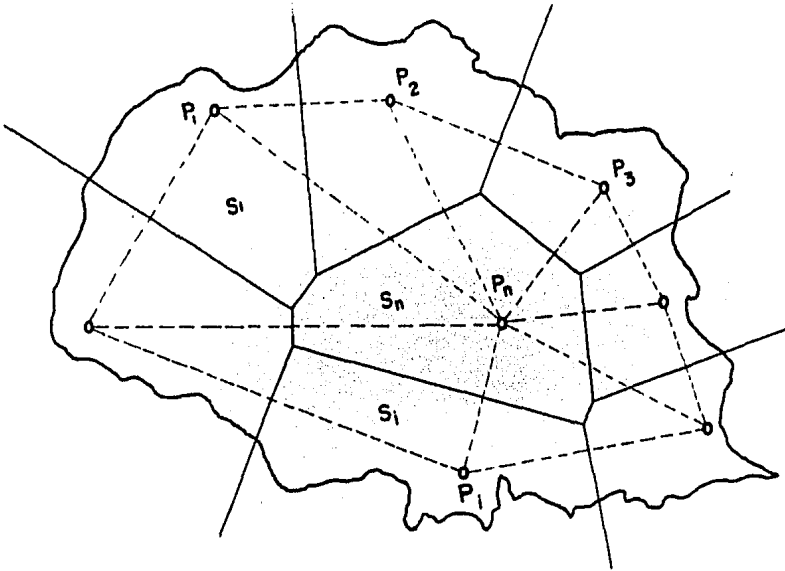


Fig. 8.- POLIGONOS DE THIESSEN.

SI LAS LLUVIAS MEDIDAS POR LOS PLUVIÓMETROS EN EL INTERVALO DE TIEMPO CONSIDERADO SON: P_1, P_2, \dots, P_n ; Y LAS ÁREAS RESPECTIVAS DE LOS DOMINIOS POLIGONALES ASIGNADAS A CADA UNO SON S_1, S_2, \dots, S_n , LA LLUVIA MEDIA SERÁ:

$$p = \frac{P_1 S_1 + P_2 S_2 + \dots + P_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad - (2)$$

LOS RESULTADOS SON BUENOS EN ZONAS LLANAS, CON PLUVIOMETRÍA DE DISTRIBUCIÓN BASTANTE HOMOGÉNEA.

c).- MÉTODO DE LAS CURVAS ISOYETAS.-

SITUADOS EN UN PLANO, LOS PLUVIÓMETROS Y LAS RESPECTIVAS CANTIDADES DE LLUVIA RECOGIDAS, EL MÉTODO CONSISTE EN INTERPOLAR LÍNEAS DE IGUAL PRECIPITACIÓN (ISOYETAS) ----

DE ACUERDO CON ESTOS VALORES, PARA EL DIBUJO DE LAS ISOYETAS NO DEBE REALIZARSE UNA SIMPLE INTERPOLACIÓN LINEAL, SINO QUE SE TENDRÁN EN CUENTA LAS CARACTERÍSTICAS DE UBICACIÓN DE CADA PLUVIÓMETRO (SITUACIÓN, VEGETACIÓN CIRCUNDANTE, ALTITUD, TOPOGRAFÍA, ETC), Y SEGÚN ELLAS SE HARÁ UNA INTERPOLACIÓN RACIONAL. (FIGURA 9).

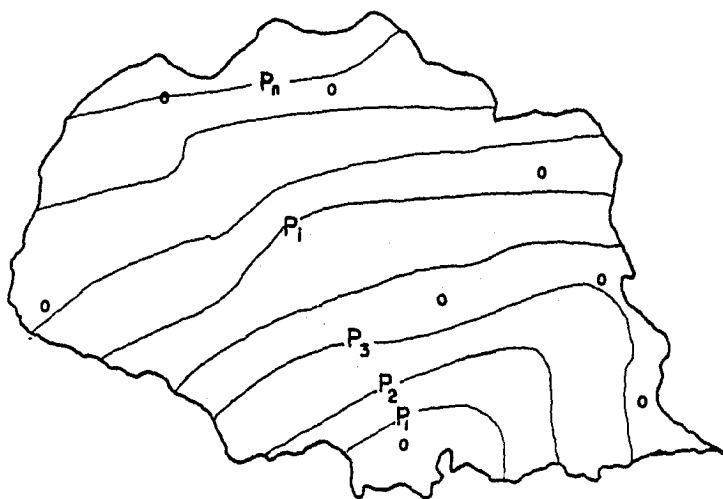


FIG. 9.- CURVAS ISOYETAS.

SEAN P_1, P_2, \dots, P_n LOS VALORES ASIGNADOS A CADA ISOYETA, Y S_1, S_2, \dots, S_n LAS ÁREAS ENTRE LAS LÍNEAS $P_1 - P_2, P_2 - P_3, \dots, P_{n-1} - P_n$. LA LLUVIA MEDIA EN LA CUENCA SERÁ:

$$P_m = \frac{\frac{P_1 + P_2}{2} S_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} S_2 + \dots + \frac{P_{n-1} + P_n}{2} S_{n-1}}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (3)$$

EXISTIRÁ DUDA EN LA LLUVIA QUE CORRESPONDE AL ÁREA SITUADA ENTRE LAS ISOYETAS EXTREMAS Y EL LÍMITE DE LA ZONA, PUEDE ADOPTARSE COMO VALOR EL DE ESAS ISOYETAS EXTREMAS Y AÑADIR EN EL NUMERADOR DE (3) EL SUMANDO CORRESPONDIENTE, O ---

BIEN TOMAR COMO VALOR EN ESAS ÁREAS LA MEDIA ARITMÉTICA DE LOS VALORES OBTENIDOS EN LOS PLUVIÓMETROS QUE CONTIENEN.

EL MÉTODO DE LAS CURVAS ISOYETAS ES EL QUE DA RESULTADOS MÁS ACEPTABLES, PERO EL CARÁCTER SUBJETIVO DEL DIBUJO DE ISOYETAS HACE NECESARIO QUE EL AUTOR POSEA UN BUEN CONOCIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS Y FÍSICAS DE LA ZONA.

EVAPORACION.-

LA EVAPORACIÓN ES EL RESULTADO DEL PROCESO FÍSICO, POR EL CUAL EL AGUA CAMBIA DE ESTADO LÍQUIDO A GASEOSO, RETORNANDO DIRECTAMENTE A LA ATMÓSFERA EN FORMA DE VAPOR. ÉSTE CAMBIO DE ESTADO PRECISA UNA FUENTE DE ENERGÍA QUE PROPORCIONE A LAS MOLÉCULAS DE AGUA, LA SUFICIENTE PARA EFECTUARLO. DE FORMA DIRECTA O INDIRECTA, ESTA ENERGÍA PROCEDE DE LAS RADIACIONES SOLARES, POR LO QUE TODO TIPO DE AGUA EN LA SUPERFICIE TERRESTRE ESTA EXPUESTA A LA EVAPORACIÓN.

CONSIDERANDO EL FENÓMENO EN UNA SUPERFICIE DE AGUA LIBRE (LAGO, RÍO, ETC.) EN LA FORMA MÁS SIMPLE DEL PROCESO, ÉSTE PUEDE ESQUEMATIZARSE ASÍ: LAS MOLÉCULAS DE AGUA ESTÁN EN CONTINUO MOVIMIENTO, CUANDO LLEGAN A LA SUPERFICIE DEL LÍQUIDO, SE CALIENTAN POR MEDIO DE RADIACIÓN SOLAR, AUMENTA SU TEMPERATURA Y EN CONSECUENCIA SU VELOCIDAD, CRECIENDO POR TANTO, SU ENERGÍA CINÉTICA, HASTA QUE ALGUNAS CONSIGUEN LIBERARSE DE LA ATRACCIÓN DE LAS MOLÉCULAS ADYACENTES Y ATRAVERZAR LA INTERFASE LÍQUIDO-GAS, CONVIRTIÉNDOSE EN VAPOR. AHORA BIEN, LA CAPA DE AIRE INMEDIATA A LA SUPERFICIE, SE SATURA PRONTO Y OCURRE SIMULTÁNEAMENTE A LA EVAPORACIÓN EL PROCESO INVERSO, POR LO QUE LAS MOLÉCULAS SE CONDENSAN Y VUELVEN AL ESTADO LÍQUIDO - LA DIFERENCIA ENTRE LA CANTIDAD DE MOLÉCULAS QUE ABANDONAN EL LÍQUIDO Y LA CANTIDAD DE MOLÉCULAS QUE VUELVEN A ÉL, MARCA EL -

CARÁCTER GLOBAL DEL FENÓMENO; SI ES POSITIVA SE ESTA PRODUCIENDO EVAPORACIÓN, SI ES NEGATIVA, CONDENSACIÓN.

PARA EVALUAR LA EVAPORACIÓN, SE HAN HECHO INTENTOS MÁS O MENOS AFORTUNADOS DE CORRELACIONAR ESTE PROCESO - CON CIERTOS FACTORES METEREOLÓGICOS QUE INFLUYEN DIRECTAMENTE - SOBRE LOS DOS MEDIOS INTERCAMBIANTES, AIRE Y AGUA. EL HECHO DE QUE MUCHOS DE ESTOS FACTORES SEAN DEPENDIENTES ENTRE SÍ, INCREMENTA LA DIFICULTAD.

ATENDIENDO A LA CAPACIDAD DE LA ATMÓSFERA QUE ENVUELVE A LA SUPERFICIE EVAPORANTE, PARA ADMITIR VAPOR DE --- AGUA, Y A LA POSIBILIDAD DE EVAPORACIÓN DEL AGUA, DALTON EN -- 1802, DIÓ LA FÓRMULA,

$$E = K(e_s - e_d) \quad (1)$$

POR LA QUE SEÑALABA QUE SIENDO CONSTANTE LAS DEMAS CIRCUNSTANCIAS; RADIACIÓN SOLAR, TEMPERATURA, VELOCIDAD DEL VIENTO, PRESIÓN ATMOSFÉRICA, ETC., LA EVAPORACIÓN ERA PROPORCIONAL A LA DIFERENCIA ENTRE LA TENSIÓN DE VAPOR SATURANTE A LA TEMPERATURA DEL AGUA (e_s) Y LA TENSIÓN DE VAPOR EXISTENTE EN EL AIRE CIRCUNDANTE (e_d). ESTA FÓRMULA, EN LA QUE EL COEFICIENTE K SE AJUSTA SEGÚN LA INFLUENCIA DE OTROS FACTORES, HA LLEGADO - HASTA NUESTROS DÍAS. LA UNIDAD GENERALMENTE EMPLEADA PARA EVALUAR LA EVAPORACIÓN ES EL mm DE ALTURA DE LÁMINA DE AGUA EVAPORADA. SE EMPLEA ESTA UNIDAD CON EL FIN DE HOMOGENEIZAR LAS - MEDIDAS DE LAS MAGNITUDES QUE INTERVIENEN EN EL CICLO HIDROLÓGICO. ESTA ALTURA SE MIDE CON AYUDA DEL EVAPORÍMETRO QUE ES UN ESTANQUE DEL TAMAÑO, FORMA Y UBICACIÓN EN EL TERRENO PREDEFINIDOS. ESTÁ CONCEBIDO PARA MEDIR LA EVAPORACIÓN DE EMBALSES O -- GRANDES LAGOS Y CASI SIEMPRE SE SITUAN PRÓXIMOS A ELLOS. LAS - MEDIDAS OBTENIDAS SON, EN GENERAL, SUPERIORES A LA EVAPORACIÓN REAL Y PRECISAN DE COEFICIENTES CORRECTORES.

MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN, -

RELACIONAN LA EVAPORACIÓN CON ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FENÓMENO Y ENGLOBALAN LOS DEMÁS EN COEFICIENTES EMPÍRICOS CONSTANTES PARA CADA LUGAR, QUE DEBEN AJUSTARSE SEGÚN LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES OBTENIDAS.

ESTAN BASADOS EN LA LEY DE DALTON (1), CUYA ECUACIÓN MULTIPLICAN POR COEFICIENTES, EN PARTE EMPÍRICOS Y EN PARTE DEPENDIENTES DE OTROS FACTORES METEOROLÓGICOS. PRESENTANDO A CONTINUACIÓN LOS MÉTODOS MÁS UTILIZADOS Y EMPLEANDO LA SIGUIENTE NOTACIÓN:

E	=	EVAPORACIÓN DIARIA EN mm
E_m	=	EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL EN mm
e_s	=	TENSIÓN DE VAPOR SATURANTE PARA LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL AGUA EN mm DE Hg
e_d	=	TENSIÓN DE VAPOR EN EL AIRE EN mm DE Hg
V_z	=	VELOCIDAD DEL VIENTO A ALTURA Z SOBRE LA SUPERFICIE EVAPORANTE EN m/s
z	=	ALTURA EN metros

e_s , e_d y V_z SON VALORES MEDIOS DIARIOS CUANDO SE CALCULA E Y VALORES MEDIOS MENSUALES SI SE CALCULA E_m .

A).- FÓRMULA DE FITZGERALD (AÑO 1886).

$$E = (0.4 + 0.449 V_o) (e_s - e_d)$$

B).- FÓRMULA DE MEYER (AÑO 1915).

$$E_m = C(1 - 0.06 V_{2.5}) (e_s - e_d)$$

PARA SUPERFICIES EVAPORANTES PEQUEÑAS (POR EJEMPLO, ESTANQUES DE EVAPORACIÓN) PUEDE SUBSTITUIRSE e_d POR LA TENSIÓN DE VAPOR SATURANTE A LA TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE EN ---

ESTACIONES PRÓXIMAS. EN ESTE CASO MEYER ACONSEJÓ EL COEFICIENTE $C = 15$. EN LAGOS GRANDES Y PROFUNDOS, $C = 11$.

c).- FÓRMULA DE LUNGEON (AÑO 1928),

$$E_m = 0.398 d (e_s - e_d) \frac{273+t}{273} \times \frac{760}{(P_a - e_s)} \quad \text{SIENDO:}$$

d = NÚMERO DE DÍAS DEL MES.

t = MEDIA MENSUAL DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS DIARIAS EN $^{\circ}\text{C}$

P_a = PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA DIARIA EN mm DE Hg

d).- FÓRMULA DE ROHWER (AÑO 1931),

$$E = 0.497(1-0.0005P) (1+0.6V_o) (e_s - e_d).$$

SIENDO P = PRESIÓN ATMOSFÉRICA DIARIA EN mm DE Hg

EN LAS FÓRMULAS ANTERIORES INTERVIENE e_d QUE DEPENDE DE LA TEMPERATURA MEDIA DIARIA O MENSUAL DE LA SUPERFICIE DEL AGUA. ÉSTA TEMPERATURA ES DIFÍCIL DE MEDIR POR LO QUE ALGUNAS DE LAS FÓRMULAS SALVAN ESTA EVENTUALIDAD SUSTITUYENDO e_d POR LA TENSIÓN DE VAPOR SATURANTE A LA TEMPERATURA DEL AIRE. - ASÍ SE HACE POR EJEMPLO, AL APLICAR LA FÓRMULA DE MEYER A EVAPORÍMETROS Y ALGUNOS AUTORES APLICAN ESTE METODO A LA FÓRMULA DE ROHWER.

EVAPOTRANSPIRACION.-

LA TRANSPIRACIÓN ES EL RESULTADO DEL PROCESO FÍSICOBIOLOGICO, POR EL CUAL EL AGUA CAMBIA DE ESTADO LÍQUIDO A GASEOSO, A TRAVÉS DEL METABOLISMO DE LAS PLANTAS, Y PASA A LA ATMÓSFERA.

LA EVAPORACIÓN Y LA TRANSPIRACIÓN SE TRATAN --

POR SEPARADO, PERO, EN CONDICIONES NATURALES, ES PRECISO REUNIR AMBOS TÉRMINOS, PUES EN TERRENOS CON VEGETACIÓN, LOS DOS PROCESOS SE EFECTÚAN SIMULTÁNEAMENTE Y SON INTERDEPENDIENTES. EL TÉRMINO EVAPOTRANSPIRACIÓN ES EL EMPLEADO PARA EXPRESAR TAL UNIÓN.

EVAPOTRANSPIRACIÓN ES EL RESULTADO DEL PROCESO POR EL CUAL, EL AGUA CAMBIA DE ESTADO LÍQUIDO A GASEOSO Y DIRECTAMENTE, O A TRAVÉS DE LAS PLANTAS, VUELVE A LA ATMÓSFERA EN FORMA DE VAPOR, ES DECIR, LA EVAPOTRANSPIRACIÓN NO ES UN FENÓMENO DISTINTO A LOS DESCRITOS, SINO A LA SUMA DE EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN, Y EL TÉRMINO, SÓLO ES APLICABLE CORRECTAMENTE A UNA DETERMINADA ÁREA DE TERRENO CUBIERTA POR VEGETACIÓN. CUANDO ÉSTA NO EXISTE, ÚNICAMENTE PODRÁ HABLARSE DE EVAPORACIÓN POR EL CONTRARIO, EN CONDICIONES NATURALES, Y AUNQUE EL FENÓMENO TIENE SUS CARACTERÍSTICAS PROPIAS, NO ES POSIBLE LA OCURRENCIA EXCLUSIVA DE TRANSPIRACIÓN.

LA UNIDAD MÁS USUAL PARA EXPRESAR LAS PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN ES EL mm DE ALTURA DE AGUA, QUE EQUIVALE A $10 \text{ m}^3/\text{Ha}$. LA MEDIDA SIEMPRE SE REFIERE A UN DETERMINADO INTERVALO DE TIEMPO.

LAS CANTIDADES DE AGUA QUE POR ESTE CONCEPTO VUELVEN A LA ATMÓSFERA Y LA ENERGÍA NECESARIA PARA ELLO, ALCANZAN CIFRAS REALMENTE NOTABLES. EN EFECTO: EN UN DÍA CÁLIDO ES FRECUENTE EN MUCHAS ZONAS UNA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE 3-4mm/día. ESTO EQUIVALE A QUE SE DESPLACEN HACIA LA ATMÓSFERA DE 30 A 40 m^3/Ha - DIA.

PARA VALUAR EL AGUA USADA POR EVAPOTRANSPIRACIÓN, SE TIENEN MÉTODOS TEÓRICOS, SEMIEMPÍRICOS Y EMPÍRICOS. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ES UN FENÓMENO MICROCLIMÁTICO Y, EN CONSECUCIÓN, SERÁN TANTO MÁS VÁLIDOS LOS MÉTODOS, CUANTO MÁS CONSIDEREN ESTA CUESTIÓN, LOS MÉTODOS TEÓRICOS SON EXCELENTES

SIEMPRE Y CUANDO SE REFLEJEN FIELMENTE LAS CONDICIONES NATURALES; SON POCO USUALES POR LO COSTOSO Y DELICADO QUE RESULTA SU APLICACIÓN.

LA NECESIDAD DE TENER, AL MENOS, ÓRDENES DE -- MAGNITUD, HACE ACEPTAR EN MUCHAS OCASIONES LOS VALORES DEDUCIDOS DE FÓRMULAS EMPÍRICAS Y SEMIEMPÍRICAS QUE SE APOYAN EN DATOS METEOROLÓGICOS CORRIENTEMENTE ASEQUIBLES; SON BARATOS Y -- SENCILLOS DE MANEJAR, SIN EMBARGO NO SON DE MUCHA UTILIDAD SI NO ESTÁN COMPARADOS CON MEDIDAS DIRECTAS DE LA ZONA DONDE SE APLICARÁN, O SE USAN ESPECIALMENTE CUANDO SE HACEN PREVISIONES FUTURAS.

LOS MÉTODOS EMPÍRICOS Y SEMIEMPÍRICOS MÁS APLICADOS SON:

THORNTHWAITE
 BLANEY-CRIDDLE
 MARKKINK
 TURC
 PENMAN (MÉTODO SEMIEMPÍRICO).

LA FÓRMULA DE TURC HA DADO EN GENERAL, VALORES MÁS ALTOS QUE LOS OBTENIDOS CON MEDIDAS DIRECTAS. POR EL CONTRARIO, CON LA FÓRMULA DE THORNTHWAITE, LOS VALORES CORRESPONDIENTES A ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS HAN RESULTADO UN POCO BAJOS. LA FÓRMULA DE BLANEY-CRIDDLE, TIENE EN CUENTA EL TIPO DE CULTIVO Y DEBE TENERSE CUIDADO EN LA SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS.

LOS VALORES OBTENIDOS POR EL MÉTODO SEMIEMPÍRICO DE PENMAN, HA DADO EN NUMEROSOS LUGARES, RESULTADOS SATISFACTORIOS. TIENE EL INCONVENIENTE DE QUE UNA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA COMÚN, NO PROPORCIONA TODOS LOS DATOS QUE REQUIERE SU APLICACIÓN.

ALGUNOS AUTORES HAN PROPUESTO FÓRMULAS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN SÓLO EN FUNCIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS COMO PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA, ETC.

CITANDO A CONTINUACIÓN, COMO EJEMPLO, LAS DE TURC, QUE EXPERIMENTÓ EN MÁS DE DOSCIENTAS CUENCAS DE DIVERSAS PARTES DEL MUNDO, Y COUTAGNE.

$$ETR = \frac{P}{0.9 + \frac{P^2}{L^2}} \quad (\text{TURC})$$

ETR = EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN mm/AÑO

P = PRECIPITACIÓN EN mm/AÑO

L = $300 + 25t + 0.05 t^2$

t = TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN °C

COUTAGNE PROPONE:

$$ETR = P + X P^2$$

ETR = EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN mm/AÑO

P = PRECIPITACIÓN EN mm/AÑO

PARA VALORES DE PRECIPITACIÓN COMPRENDIDOS ENTRE:

$$\frac{1}{8X} \quad \text{y} \quad \frac{1}{2X}$$

SIENDO:

$$X = \frac{1}{0.08 + 0.14 t}$$

t = TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN °C

INFILTRACION.-

EL AGUA PRECIPITADA SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, QUEDA DETENIDA, ESCURRE POR ELLA, O BIEN PENETRA HACIA EL INTERIOR. DE ESTA ÚLTIMA FRACCIÓN, SE DICE QUE SE HA INFILTRADO.

LA INFILTRACIÓN ES EL PROCESO POR EL CUAL EL AGUA PENETRA EN LOS ESTRATOS DE LA SUPERFICIE DEL SUELO Y SE MUEVE HACIA EL MANTO FREÁTICO. EL AGUA PRIMERO SATISFACE LA DEFICIENCIA DE HUMEDAD DEL SUELO Y, DESPUÉS, CUALQUIER EXCESO PASA A FORMAR PARTE DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

EL INTERÉS DEL FENÓMENO, ES EVIDENTE, SI SE CONSIDERA QUE LA MAYOR PARTE DE LOS VEGETALES UTILIZAN PARA SU DESARROLLO AGUA INFILTRADA Y QUE EL AGUA SUBTERRÁNEA DE UNA REGIÓN, TIENE COMO PRESUPUESTO PREVIO PARA SU EXISTENCIA, QUE SE HAYA PRODUCIDO INFILTRACIÓN.

LA CANTIDAD MÁXIMA DE AGUA QUE PUEDE ABSORBER UN SUELO EN DETERMINADAS CONDICIONES SE LLAMA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN MIENTRAS OCURRE LA LLUVIA EN EXCESO. ANTES O DESPUÉS DE ESTA LLUVIA, LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN ESTÁ LIGADA A LA INTENSIDAD DE LLUVIA.

LA INFILTRACIÓN PUEDE CONSIDERARSE COMO UNA SECUENCIA DE TRES PASOS: ENTRADA A LA SUPERFICIE, TRANSMISIÓN A TRAVÉS DEL SUELO, Y AGOTAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAJE DEL SUELO. ADEMÁS DE ESTOS FACTORES, SE DEBEN TENER EN CUENTA EL MEDIO PERMEABLE Y EL FLUJO.

1) ENTRADA A LA SUPERFICIE. LA SUPERFICIE DEL SUELO PUEDE OBSTRUIRSE POR EL LAVADO DE FINOS Y EL IMPACTO DE GOTAS DE AGUA, LO CUAL EVITA O RETARDA LA ENTRADA DEL AGUA DENTRO DEL SUELO; POR ESTE HECHO, UN SUELO CON BUENA RED DE DRENAJE PUEDE TENER BAJA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN. LA VEGETACIÓN TIENE

UNA INFLUENCIA IMPORTANTE EN ESTE ASPECTO,

ii) TRANSMISIÓN A TRAVÉS DEL SUELO. LA RAPIDEZ CON QUE EL AGUA PENETRA AL SUELO DEPENDE DE SU CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN, LA CUAL VARÍA PARA LOS DIFERENTES HORIZONTES DEL PERFIL DEL SUELO; UNA VEZ QUE ÉSTE SE HA SATURADO, LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN ESTÁ LIMITADA POR LA MENOR TRANSMISIÓN DEL AGUA INFILTRADA QUE TENGA EL SUELO.

iii) AGOTAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAJE DEL SUELO, EL ALMACENAJE DISPONIBLE EN CUALQUIER HORIZONTE DEPENDE DE SU POROSIDAD, ESPESOR Y CONTENIDO DE HUMEDAD, LA NATURALEZA Y MAGNITUD DE LA POROSIDAD DEL HORIZONTE DEPENDE DE SU TEXTURA, ESTRUCTURA, CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA, PENETRACIÓN DE LAS RAICES, ETCETERA.

iv) CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO PERMEABLE. PARA EL SUELO LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN ESTÁ RELACIONADA CON EL TAMAÑO DEL PORO Y SU DISTRIBUCIÓN. EN LAS ARENAS, LOS POROS SON RELATIVAMENTE ESTABLES, AUNQUE DURANTE UNA TORMENTA SE PUEDE FORMAR UNA ARENA MÁS DENSA; SIN EMBARGO ESTE CAMBIO ES RELATIVAMENTE LENTO COMPARADO CON LAS ARCILLAS Y LOS LIMOS. EN SUELOS EN ESTADO SECO CON CANTIDADES APRECIABLES DE LIMO O ARCILLA ES POSIBLE TENER POROS RELATIVAMENTE LARGOS QUE PUEDEN DESINTEGRARSE DURANTE UNA TORMENTA. DICHS SUELOS NORMALMENTE CONTIENEN MATERIAL COLOIDAL, EL CUAL SE HINCHA CUANDO ESTA HÚMEDO; ASÍ, UN CAMBIO EN LA PERMEABILIDAD DE LA MASA ES MÁS FRECUENTE QUE EN LAS ARENAS. POR OTRA PARTE EL IMPACTO DE LAS GOTAS DE AGUA COMPACTAN EL SUELO Y OCASIONAN QUE PARTÍCULAS MUY PEQUEÑAS DE LIMO Y ARCILLA PENETREN EN LOS POROS DE MATERIAL, SELLÁNDOLOS Y REDUCIENDO LA INFILTRACIÓN.

v) CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO. OTRO GRUPO DE FACTORES QUE AFECTAN A LA INFILTRACIÓN, AUNQUE EN GRADO MENOR, SON AQUELLOS QUE MODIFICAN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA. UNO DE LOS CAMBIOS MÁS IMPORTANTES EN EL AGUA INFILTRADA ES SU

CONTAMINACIÓN, QUE, EN LA MAYORÍA DE LOS SUELOS, OCURRE EN -- MAYOR O MENOR ESCALA, DEBIDO A LAS ARCILLAS FINAS Y LOS COLOIDES. ÉSTO AFECTA EN FORMA DIRECTA A LA INFILTRACIÓN, YA QUE - EL MATERIAL EN SUSPENSIÓN QUE LLEVA EL AGUA INFILTRADA BLOQUEA LOS POROS DEL SUELO POR LOS CUALES PASA.

LA TEMPERATURA DEL FLUIDO TAMBIÉN AFECTA A LA CANTIDAD DE AGUA QUE SE MUEVE A TRAVÉS DEL SUELO.

UNIDADES Y MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CAPACI-- DAD DE INFILTRACIÓN. ES CORRIENTE UTILIZAR COMO UNIDAD EL --- mm/hora. EN ALGUNOS CASOS EL mm/DÍA. PARA MEDIDAS DIRECTAS, - LOS INTERVALOS DE TIEMPO ENTRE DOS MEDIDAS SUCESIVAS SON GENE-- RÁLMENTE MÁS CORTOS, PERO EL RESULTADO SE TRADUCE A UNA DE LAS UNIDADES CITADAS. UN mm EQUIVALE A $10\text{m}^3/\text{Ha}$.

TODOS LOS FACTORES QUE AFECTAN A LA INFILTRA-- CIÓN, TIENEN UN CARÁCTER EMINENTEMENTE LOCAL. POR ESO LOS MÉ-- TODOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN, TIENEN, - SÓLO UN VALOR RELATIVO E INCLUSO EN MUCHOS CASOS, LOS RESULTA-- DOS DEPENDEN DEL MÉTODO EMPLEADO.

EXISTEN TRES GRUPOS FUNDAMENTALES DE MÉTODOS:

- a).- INFILTRÓMETROS
- b).- ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO EN CUENCAS - PEQUEÑAS.
- c).- LISÍMETROS.

a).- INFILTRÓMETROS.- SE UTILIZAN PARA ME-- DIDAS MUY LOCALES Y CON ELLOS, LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN - SE DETERMINA DIRECTAMENTE. CON BASTANTES RESERVAS, LOS VALO-- RES OBTENIDOS PUEDEN APLICARSE A PEQUEÑAS CUENCAS HOMOGÉNEAS. CUANDO LA CUENCA ES MAYOR, Y NO HOMOGÉNEA EN SUELO Y VEGETA-- CIÓN, DEBERÁ SUBDIVIDIRSE EN ÁREAS QUE LO SEAN Y UTILIZAR IN-

FILTRÓMETROS EN CADA UNA DE ELLAS,

HAY DOS TIPOS DE INFILTRÓMETROS, EL TIPO INUNDA DOS Y EL DE SIMULADOR DE LLUVÍA, EN EL PRIMERO, LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN SE DEDUCE DEL VOLUMEN DE AGUA QUE ES NECESARIO --- AÑADIR PARA MANTENER UNA LÁMINA DE ESPESOR CONSTANTE SOBRE UNA ÁREA BIEN DEFINIDA DE TERRENO. SE DEBE PROCURAR QUE ESTE ESPE-- SOR SEA SIMILAR AL QUE HABITUALMENTE TIENE LA LÁMINA DE AGUA -- DÉSPUÉS DE UNA LLUVIA O RIEGO,

LOS DEFECTOS MÁS IMPORTANTES DE ESTE TIPO DE - MÉTODOS SON LA ELIMINACIÓN DE LA COMPACTACIÓN QUE PRODUCE LA -- LLUVIA, Y QUE NO ES POSIBLE APLICARLOS SIN ALTERAR LA ESTRUCTU-- RA DEL TERRENO.

LOS MODELOS DIFIEREN EN FORMA Y MÉTODOS DE ME-- DIDA, LOS HAY CONCÉNTRICOS (MÉTODO DE MUUNTS) Y EL CÍLINDRO --- EXCAVADO EN SUELO (MÉTODO DE PORCHET), (FIGURA 10).

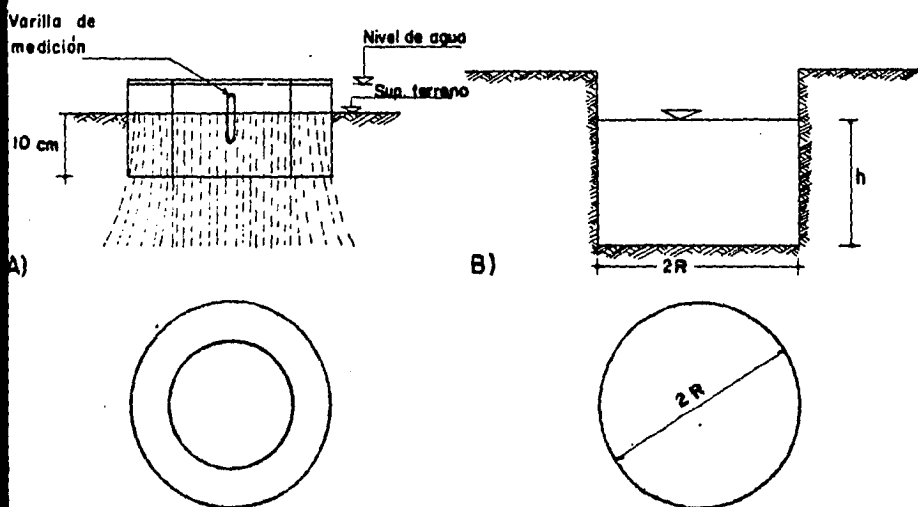


Fig. 10.- INFILTRÓMETROS TIPO INUNDADOR
 A).- CÍLINDROS CONCÉNTRICOS
 B).- CÍLINDRO EXCAVADO EN SUELO

INFILTRÓMETRO TIPO SIMULADOR DE LLUVIA. EL --- AGUA MEDIANTE UN SISTEMA DE TIPO ASPERSIÓN, SE DISTRIBUYE LO -- MÁS UNIFORMEMENTE POSIBLE POR LA PARCELA DE LA QUE SE QUIERE CO-- NOCER LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN. ESTAS PARCELAS SON DE PEQUE-- ÑO TAMAÑO (1 A 40m²) Y PARA COMPROBAR LA UNIFORMIDAD DEL REPAR-- TO Y MEDIR EL AGUA RECIBIDA SE COLOCAN EN ELLAS ALGUNOS PLUVIÓ-- METROS. DEBE EXISTIR, ASÍ MISMO, UN SISTEMA PARA MEDIR EL ESCU-- RRRIMIENTO DIRECTO, CONOCIDA LA LLUVIA P Y EL ESCURRIMIENTO S -- Y DESPRECIANDO LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, POR SER MUY CORTOS LOS IN-- TERVALOS ENTRE MEDIDAS SUCESIVAS, EL VALOR DE LA INFILTRACIÓN ES:

$$I = P - S$$

EN EL CORRESPONDIENTE INTERVALO DE TIEMPO,

CON ESTE TIPO SE INTENTA REPRODUCIR LO MÁS EXAC-- TAMENTE POSIBLE LA FORMA NATURAL DE OCURRENCIA DEL FENÓMENO. -- ALGUNOS MODELOS APLICAN CIERTA PRESIÓN AL AGUA DISTRIBUIDA, PA-- RA QUE LA COMPACTACIÓN DEL TERREÑO SEA SIMILAR A LA QUE PRODU-- CE LA LLUVIA.

B).- ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS EN CUENCAS PEQUE-- ÑAS.- EL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE UNA CUENCA DE PEQUEÑA - EXTENSIÓN (MENOR DE 10 km²) ES EN ESENCIA, LA REPRODUCCIÓN QUE SE PRETENDE CON LOS INFILTRÓMETROS SIMULADORES DE LLUVIA.

EN EL CAUCE QUE DRENA, DESPUÉS DE UNA LLUVIA, - INCLUSO MODERADA, SE PRODUCE UN APRECIABLE INCREMENTO DEL CAU-- DAL SUPERFICIAL, Y, EN GENERAL, LA CORRIENTE DE AGUA SERÁ INTER-- MITENTE Y SÓLO EXISTIRÁ CUANDO LLUEVA.

CON UN LIMNÍGRAFO INSTALADO EN LA SECCIÓN TRANS-- VERSAL DEL CAUCE SITUADA A INFERIOR COTA, SE TENDRÁ UN REGISTRO CONTINUO DE NIVELES Y, SU CORRESPONDIENTE TRADUCCIÓN A CAUDALES PERMITE DEDUCIR EL VOLUMEN DE AGUA QUE HA ESCURRIDO SUPERFICIAL-- MENTE. EL RESTO HASTA EL TOTAL DE AGUA PRECIPITADA SERÁ LA SU--

MA DE: INTERCEPCIÓN, DETENCIÓN SUPERFICIAL, EVAPOTRANSPIRACIÓN E INFILTRACIÓN, DE ESTOS SUMANDOS PUEDEN DESPRECIARSE LOS TRES PRIMEROS, DADO QUE EL ÁREA ES PEQUEÑA Y EN EL TIEMPO EN QUE SE HACE EL BALANCE NO SERÁ SIGNIFICATIVA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN -- ASÍ PUES, CON POCO ERROR POR EXCESO, EL VOLUMEN INFILTRADO SERÁ LA DIFERENCIA ENTRE EL VOLUMEN DE AGUA PRECIPITADA Y EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

EL TIEMPO DURANTE EL CUAL PUEDE CONSIDERARSE -- QUE SE INFILTRA ESE VOLUMEN EN EL CONJUNTO DE LA CUENCA ES --- CUESTIÓN DE APRECIACIÓN. ESTA FALTA DE DEFINICIÓN PRECISA DEL TIEMPO, HACE QUE EL MÉTODO SE EMPLEE PARA REALIZAR COMPARACIONES ENTRE LAS CAPACIDADES DE INFILTRACIÓN DE DISTINTAS CUENCAS MÁS QUE PARA LA OBTENCIÓN DE VALORES ABSOLUTOS,

c),- LISÍMETROS,- EL ORIGEN DE LOS LISÍMETROS SE REMONTO AL AÑO 1688 EN FRANCIA, TENÍAN COMO OBJETIVO LA DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN Y USABAN PARA ELLO UN COLECTOR DE AGUA QUE ATRAVESABA TOTALMENTE EL TERRENO CONTENIDO EN EL APARATO. EL SISTEMA, CON ALGÚN PERFECCIONAMIENTO, COMO DISPOSITIVO DE SUCCIÓN, CÁPAS DRENANTES, ETC., HA LLEGADO A LA ACTUALIDAD Y SON MUCHOS Y DE VARIADAS FORMAS LOS MODELOS INSTALADOS EN DISTINTOS LUGARES DEL MUNDO,

AL AGUA RECOGIDA EN EL COLECTOR DEBE AÑADIRSE LA MEDIDA DEL INCREMENTO EN RETENCIÓN POR EL TERRENO, Y UNA ESTIMACIÓN DE LA PARTE DE AGUA INFILTRADA QUE SE PIERDE POR EVAPOTRANSPIRACIÓN. ESTA ÚLTIMA PUEDE DEPRECIARSE EN INTERVALOS CORTOS DE TIEMPO.

EN MUCHAS OCASIONES Y ESPECIALMENTE EN CUENCAS DE MAYOR EXTENSIÓN, INTERESA MÁS QUE LA INTENSIDAD DE INFILTRACIÓN, UN VALOR GLOBAL DEL VOLUMEN DE AGUA INFILTRADO EN PERÍODOS DE TIEMPO MÁS LARGOS (UN MES, UNA ESTACIÓN, UN AÑO) QUE ES, EN DEFINITIVA, EL QUE PERMITIRÁ ESTIMAR, RACIONALMEN-

TE, CUAL DEBE SER LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA, SIN MERMA DE LAS RESERVAS O VER A QUE RITMO SE IRÁN AGOTANDO ESTAS.

SI PUEDE DETERMINARSE EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, AFORANDO TODOS LOS CAUCES QUE DRENAN LA ZONA SE TENDRÁ, PARA EL PERÍODO CONSIDERADO, EL VOLUMEN DE INFILTRACIÓN, RESTANDO EL DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LOS EXCEDENTES. ÉSTA ESTIMACIÓN SERÁ POR DEFECTO QUE UNA PARTE DEL AGUA INFILTRADA VUELVE AL CAUCE COMO AGUA SUPERFICIAL, Y OTRA PARTE QUEDA RETENIDA POR EL SUELO, PERO EL VOLUMEN OBTENIDO ES, EN DEFINITIVA EL QUE INTERESA A EFECTOS DE ESTIMAR LA RECARGA DE AGUA EN LOS ACUÍFEROS.

OTROS BALANCES HÍDRICOS, SE BASAN EN OBSERVACIONES DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA DEDUCIR DE ELLAS, Y TENIENDO EN CUENTA LAS EXTRACCIONES, EL VOLUMEN INFILTRADO EN UN PERÍODO DE TIEMPO,

ESCURRIMIENTO.-

ES EL AGUA QUE CORRE POR LOS CAUCES Y ES PRODUCTO DIRECTO DE LA PRECIPITACIÓN O COMBINADO CON LA APORTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS; LLAMÁNDOSE AL PRIMERO ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL Y AL SEGUNDO, ESCURRIMIENTO BASE, SUBSUPERFICIAL O SUBTERRÁNEO; ASÍ MISMO DENOMINANDO A LOS CAUCES QUE SIEMPRE TIENEN GASTO BASE, CORRIENTES PERENNES; A LOS QUE CASI TODO EL TIEMPO PRESENTAN GASTO BASE, SE LES DENOMINA CORRIENTES INTERMITENTES Y LOS QUE SOLAMENTE PRESENTAN ESCURRIMIENTO DIRECTO SERÁN LAS CORRIENTES EFÍMERAS.

EL CICLO DE ESCURRIMIENTO ES EL TÉRMINO DESCRIPTIVO QUE SE APLICA A AQUELLA PARTE DEL CICLO HIDROLÓGICO ENTRE LA PRECIPITACIÓN INCIDENTE SOBRE UN ÁREA Y LA DESCARGA SUBSIGUIENTE DE ESTA AGUA ATRAVÉS DE CAUCES SUPERFICIALES O EVAPOTRANSPIRACIÓN, LA EVIDENCIA ESTADÍSTICA, LA OBSERVACIÓN DE

CAMPO Y TAMBIÉN LA SIMPLE LÓGICA SUGIEREN QUE EL ESCURRIMIENTO ES RARA VEZ GENERADO UNIFORMEMENTE SOBRE UNA CUENCA. TODAS LAS VARIACIONES EN LA CANTIDAD E INTESIDAD DE LA PRECIPITACIÓN, -- LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO, LA COBERTURA VEGETAL, LA HUME-- DAD ANTECEDENTE Y LA TOPOGRAFÍA ACTÚAN SIMULTÁNEAMENTE PARA -- CREAR UN PATRÓN DE COMPORTAMIENTO COMPLEJO, A PESAR DE ÉSTO, - LA PRÁCTICA DE ESTIMAR EL ESCURRIMIENTO COMO UN PORCENTAJE FI-- JO DE LA PRECIPITACIÓN ES EL PROCEDIMIENTO MÁS COMUNMENTE UTI-- LIZADO.

POR LO ANTERIOR SE HACE NECESARIO EL ESTUDIO -- DEL RÉGIMEN DEL RÍO POR MEDIO DE HIDROGRAMAS QUE OBTIENEN SUS DATOS A PARTIR DE LAS ESTACIONES DE AFORO.

EL HIDROGRAMA DE UNA CORRIENTE ES LA REPRESEN-- TACIÓN GRÁFICA DE SUS VARIACIONES DE FLUJO, ARREGLADAS EN ORDEN CRONOLÓGICO. EN GENERAL, PARA EXPRESAR EL FLUJO SE USAN LAS UNIDADES DEL GASTO EN m^3/s , EN LAS ORDENADAS, Y EL TIEMPO EN HORAS EN LAS ABCISAS. EL ANÁLISIS DE UN HIDROGRAMA CONSISTE EN -- SEPARAR DE ÉL LOS ESCURRIMIENTOS CON BASE EN LAS DIVERSAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO QUE LOS ORIGINAN; PARA FINES PRÁCTICOS SE CONSIDERAN LOS ESCURRIMIENTOS BASE Y DIRECTO COMO LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE UN HIDROGRAMA. ASÍ EL VOLUMEN DE ESCURRIMIEN-- TO DIRECTO SERÁ IGUAL AL ÁREA DEL HIDROGRAMA DE LA PARTE CORRES-- PONDIENTE AL ESCURRIMIENTO DIRECTO DE DICHO HIDROGRAMA.

EL HIDROGRAMA TIPO (FIGURA 11), OBTENIDO DESPUÉS DE UN AGUACERO ES UNA CURVA EN FORMA DE CAMPANA ASIMÉTRICA EN - LA QUE SE DISTINGUEN CUATRO ZONAS.

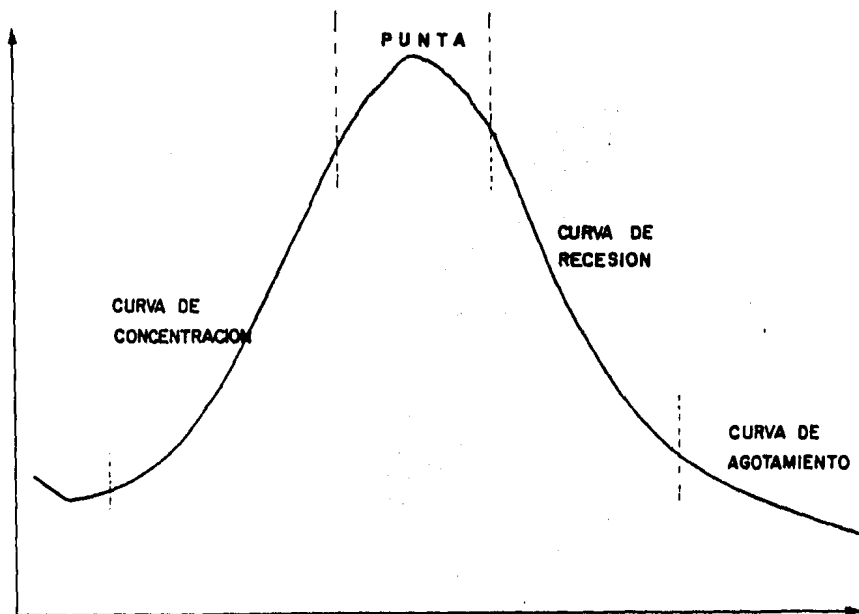


Fig. 11.- HIDROGRAMA TIPO.

I).- LA CURVA DE CONCENTRACIÓN; ES LA CURVA -- ASCENDENTE QUE CORRESPONDE AL ASCENSO DE LA CRECIDA, LA FORMA -- DE ESTA CURVA DEPENDE DE LA DURACIÓN Y DE LA UNIFORMIDAD EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO DE LAS PRECIPITACIONES, DE LA OROGRA-- FÍA DE LA CUENCA VERTIENTE, DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD INI-- CIALES Y DEL MANTO VEGETAL, LA TENDENCIA A LA ACCELERACIÓN DEL -- CRECIMIENTO DE LOS CAUDALES EN EL CURSO DEL ASCENSO DE LA CRE-- CIDA ES REFORZADA POR EL HECHO DE QUE LA PROPORCIÓN DE AGUAS -- METEÓRICAS QUE SE INFILTRAN ES MÁS IMPORTANTE EN LA PRIMERA FA-- SE DEL AGUACERO.

II).- LA PUNTA, ES LA ZONA DEL CAUDAL MÁXIMO, POCAS VECES ES TÍPICA A LA DEL ESQUEMA,

III).- LA CURVA DE RECESIÓN, ES LA CURVA DES-- CENDENTE QUE TRADUCE LA CIRCULACIÓN DEL AGUA ACUMULADA EN LA -- CUENCA DESPUÉS DE QUE CESA LA LLUVIA. SU FORMA NO DEPENDE DE --

LAS VARIACIONES DE INTENSIDAD DE LAS CAIDAS DE AGUA METEÓRICAS - Y DE LA INFILTRACIÓN, ESTA CURVA ES FUNCIÓN ESENCIALMENTE DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA RED HIDROGRÁFICA Y SOBRE TODO DE LA SUPERFICIE DE LA CUENCA VERTIENTE, ES LA SUMA DE LOS CAUDALES DE LA CIRCULACIÓN SUBTERRÁNEA Y DE LAS DECRECIDAS ELEMENTALES -- DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

IV).- LA CURVA DE AGOTAMIENTO; REPRESENTA EL - DECREMENTO DEL CAUDAL DESPUÉS DE UN TIEMPO BASTANTE LARGO QUE SIGUE AL CESE DEL ESCURRIMIENTO, CORRESPONDE A UN PERÍODO YA --- ALEJADO DEL AGUACERO, CON UNA PENDIENTE MUY DÉBIL. ESTA CURVA - ES LA EXPRESIÓN DE LA CIRCULACIÓN SUBTERRÁNEA POR TODA LA SUPERFICIE DE LA CUENCA; ES EL CAUDAL BASE, SU ESTUDIO ES MUY IMPOR-- TANTE PARA LA EVALUACIÓN DE LAS RESERVAS ACUÍFERAS SUBTERRÁNEAS O CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE UNA CUENCA, COMO LO REPRESENTA ESTE TRABAJO.

LA OBTENCIÓN DE LOS HIDROGRAMAS SE HACE A PARTIR DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS QUE SE INSTALAN EN LOS RÍOS Y EN LUGARES ESTRATÉGICOS CON LAS ESTRUCTURAS ADECUADAS PARA PODER MEDIR EL GASTO QUE POR AHÍ PASA EN DIFERENTES TIEMPOS.

EL AFORO DE CORRIENTES SE PUEDE HACER POR DIVER SAS FORMAS, DEPENDIENDO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL RÍO POR MEDIR, ASÍ COMO DEL EQUIPO DISPONIBLE.

LOS PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR EL GASTO --- QUE PASA POR UNA CORRIENTE SE PUEDEN AGRUPAR EN:

- 1.- SECCIONES DE CONTROL
- 2.- RELACIÓN SECCIÓN-VELOCIDAD.
- 3.- RELACIÓN SECCIÓN-PENDIENTE.

A).- SECCIONES DE CONTROL.- ES EL MÁS EXAC- DE LOS TRES, PERO SÓLO ES APLICABLE A CAUCES ARTIFICIALES O RÍOS DE SECCIÓN PEQUEÑA Y ESCASO ESCURRIMIENTO. LA SECCIÓN DE

CONTROL DE UNA CORRIENTE ES AQUELLA DONDE LA ENERGÍA ESPECÍFICA DEL ESCURRIMIENTO ES MÍNIMA. DICHA ENERGÍA ESTÁ RELACIONADA CON EL TIRANTE CRÍTICO, POR LO QUE SE DICE QUE HAY UNA SECCIÓN DE CONTROL DONDE SE PRESENTA EL TIRANTE CRÍTICO. ESTE OCURRE CUANDO EXISTE LEVANTAMIENTO EN EL FONDO DEL CAUCE, ESTRECHAMIENTO EN LA SECCIÓN O UNA COMBINACIÓN DE AMBOS. LA SECCIÓN DE CONTROL PUEDE SER ARTIFICIAL O NATURAL; UN EJEMPLO TÍPICO DE LA PRIMERA ES EL VERTEDOR, EL CUAL PUEDE SER DE PARED DELGADA O GRUESA, DEPENDIENDO DEL ANCHO DE LA CRESTA VERTEDORA QUE ESTÁ EN CONTACTO CON EL AGUA.

b).- RELACIÓN SECCIÓN-VELOCIDAD.- ES EL MÁS USUAL Y ES UTILIZABLE EN CUALQUIER TIPO DE CORRIENTE. SE BASA EN EL PRINCIPIO DE CONTINUIDAD.

$$Q = v \cdot A \quad (1)$$

DONDE:

A = ÁREA HIDRÁULICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CORRIENTE, EN m^2 .

Q = GASTO QUE PASA POR ESA SECCIÓN, EN m^3/s .

v = VELOCIDAD MEDIA DE LA CORRIENTE EN DICHA SECCIÓN, EN m/s .

ESTO IMPLICA QUE, PARA CONOCER EL GASTO DE UN RÍO, EN CIERTA SECCIÓN DE ÉSTE, SE REQUIERE VALUAR SU VELOCIDAD Y SU ÁREA.

SI SE DETERMINA EL PERFIL DE LA SECCIÓN DE AFOROS, AL CONOCER EL TIRANTE DEL AGUA SE OBTIENE EL ÁREA HIDRÁULICA. ENTONCES, EL PROBLEMA SE REDUCE A MEDIR EN UNA ESTACIÓN DE AFOROS LAS ELEVACIONES Y VELOCIDADES MEDIAS DEL AGUA, PARA CALCULAR EL GASTO QUE PASA EN EL MOMENTO DE EFECTUAR DI--

CHAS MEDICIONES,

c),- RELACIÓN SECCIÓN-PENDIENTE.- ES EMPLEADO PARA COMPLETAR LOS REGISTROS QUE NO PUDIERON OBTENERSE MEDIANTE LA RELACIÓN SECCIÓN-VELOCIDAD, AUNQUE ES MUY USADO PARA OBTENER GASTOS MÁXIMOS DE CORRIENTES CUANDO NO SE DISPONE DE APARATOS - DE MEDICIÓN, ESTE CRITERIO PERMITE OBTENER EL GASTO DE UNA CO--RRIENTE A PARTIR DE LA FÓRMULA DE MANNING, PARA ESTO SE REQUIE--RE CONOCER LAS CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DEL TRAMO DE RÍO -- DONDE SE QUIERE VALUAR EL GASTO Y, EL NIVEL DEL AGUA PARA ESE -- GASTO EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL INICIO Y TERMINACIÓN - DEL TRAMO,

EL TRAMO DEL RÍO DEBE SER LO MÁS UNIFORME PO--SIBLE PARA NO TENER SECCIONES DE CONTROL DENTRO DE ÉL. SEGÚN - MANNING:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

- n = COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING
 R = RADIO HIDRÁULICO EN m
 S = PENDIENTE DEL GRADIENTE DE ENERGÍA Ó DEL TERRENO
 v = VELOCIDAD MEDIA, EN m/s .

SI SE CONOCE EL ÁREA HIDRÁULICA DE LA SECCIÓN - TRANSVERSAL A, SUSTITUYENDO LA ECUACIÓN 2 EN LA ECUACION 1, SE TIENE QUE EL GASTO ES:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (3)$$

CURVAS ELEVACIONES-GASTOS.- UNA VEZ VALUADO - EL GASTO EN LA SECCIÓN DE MEDICIÓN Y CONOCIDA LA ELEVACIÓN CO--RRESPONDIENTE DE LA SUPERFICIE DEL AGUA, ES POSIBLE DIBUJAR UNA CURVA DE ELEVACIONES CONTRA GASTOS, ÉSTA CURVA ES CONTINUA SI

LA SECCIÓN DE CONTROL ES CONSTANTE Y NO SE PRESENTAN ALTERACIONES DEBIDAS A SEDIMENTACIÓN O EROSIÓN Y, ADEMÁS, SI LA CORRIENTE TIENE RÉGIMEN ESTABLECIDO EN EL MOMENTO DE EFECTUAR LAS MEDICIONES DE ELEVACIONES Y DE GASTOS,

EL DISPONER DE CURVAS ELEVACIONES-GASTOS RESULTA DE GRAN UTILIDAD, PUES PERMITE INFERIR EL GASTO CONOCIENDO SÓLO LA ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL AGUA,

ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.-

ES AQUEL QUE PROVIENE DE LA PRECIPITACIÓN NO INFILTRADA Y QUE ESCURRE SOBRE LA SUPERFICIE DEL SUELO Y LA RED DE DRENAGE HASTA SALIR DE LA CUENCA, SU EFECTO SOBRE EL ESCURRIMIENTO TOTAL ES DIRECTO Y SÓLO EXISTIRÁ DURANTE UNA TORMENTA E INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE QUE ESTA CESE, DENOMINÁNDOSE A ESTA PARTE DE LA PRECIPITACIÓN QUE CONTRIBUYE AL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, PRECIPITACIÓN EN EXCESO,

LOS FACTORES DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL SON LAS CARACTERÍSTICAS DE LA PRECIPITACIÓN Y DEL SUELO, EN LAS PRECIPITACIONES DEBE TENERSE EN CUENTA LA ALTURA DE PRECIPITACIÓN, LA INTENSIDAD INSTANTÁNEA, LA INTENSIDAD MEDIA, LA DURACIÓN Y LA REPARTICIÓN DE LA LLUVIA, EL SUELO INTERVIENE CON SU TOPOGRAFÍA, SU NATURALEZA LITOLÓGICA, SU MANTO VEGETAL, SU HUMEDAD Y SU COEFICIENTE DE RETENCIÓN, LA ESTACIÓN DEL AÑO JUEGA TAMBIÉN UN PAPEL IMPORTANTE YA QUE INFLUYE EN LA VEGETACIÓN Y LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN, SE OBSERVA EN TODOS LOS CASOS UN LAPSO, UN RETRASO EN EL ESCURRIMIENTO ENTRE EL INSTANTE EN QUE CAEN LAS PRIMERAS GOTAS DE LLUVIA Y AQUEL EN QUE EL EFECTO DE LA PLUVIOMETRÍA SE HACE SENTIR EN EL EXTREMO DE LA CUENCA, ESTE RETRASO ES DEBIDO EN MAYOR O MENOR IMPORTANCIA A:

1).- EL COMIENZO DEL AGUACERO; CON SU CANTI-

DAD DE AGUA NECESARIA PARA SATURAR EL SUELO, CUANDO ESTE DÉFICIT DE AGUA HA SIDO CUBIERTO, SE FORMA UNA DELGADA PELÍCULA DE AGUA EN LA SUPERFICIE DEL SUELO, QUE EN LAS PENDIENTES CIRCULA POR GRAVEDAD Y ESTE MOVIMIENTO ES MÁS O MENOS FRENADO POR LAS IRREGULARIDADES DEL SUELO Y DE LA VEGETACIÓN.

11).- LA DURACIÓN DE LA CIRCULACIÓN DEL AGUA EN LA RED HIDROGRÁFICA O DESARROLLO DE LOS CURSOS DE AGUA EN UNA CUENCA VERTIENTE DETERMINADA.

DE ELLO RESULTA QUE EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO DE LA CUENCA, EL CAUDAL CRECE CON LAS SUCESIVAS LLEGADAS DE LOS APORTES DEL ESCURRIMIENTO PROCEDENTES DE LOS DIVERSOS SECTORES DE LA CUENCA VERTIENTE; INCLUSO DESPUÉS DE HABER CESADO LA LLUVIA, HASTA LLEGAR A UN MÁXIMO, EL MOMENTO MÁXIMO DE LA CRECIDA EN DONDE EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL ES EL FACTOR PRINCIPAL -- DEL CAUDAL. DESPUES EL GASTO DECRECE Y ACABADO, EL ESCURRIMIENTO ES ALIMENTADO UNICAMENTE POR LOS APORTES DE LA CIRCULACIÓN - SUBTERRÁNEA.

ESCURRIMIENTO SUBTERRANEO.

EL ESCURRIMIENTO BASE ES DEBIDO AL AGUA QUE CORRE POR LOS CAUCES Y ES PRODUCTO DIRECTO DE LA APORTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS; LA ZONA SATURADA, AL LLEGAR A LA SUPERFICIE DEL TERRENO, NO DA LUGAR A UN FLUJO CONCENTRADO, SINO A UNA ZONA DE FLUJO DISEMINADO EN LA QUE EL AGUA SUBTERRÁNEA ALIMENTA A UN RÍO O A UN LAGO. EN OCASIONES ES POSIBLE QUE NO EXISTA SIQUIERA ESTA ZONA DE FLUJO DISEMINADO Y QUE LA DESCARGA DEL EMBALSE SUBTERRÁNEO SE REALICE MEDIANTE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE PLANTAS - CUYAS RAÍCES ALCANZAN LA ZONA SATURADA. ASÍ, EL ESCURRIMIENTO - BASE ES EL QUE SE MANTIENE EN TODO TIEMPO CON CIERTA REGULARIDAD, AÚN CUANDO NO HAYA LLUVIA DESDE BASTANTE TIEMPO ANTES EN TODA LA CUENCA, ÉSTA FORMADO POR EL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO

Y POR EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DIFERIDO QUE ES AQUELLA PARTE DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL QUE LLEGA A LA ESTACIÓN DE AFOROS CON UN RETRASO CONSIDERABLE CON RESPECTO A LA LLUVIA QUE LO ORIGINÓ, DEBIDO A QUE FUE RETENIDO TEMPORALMENTE EN UN LAGO O EMBALSE, O EN UNA ZONA PANTANOSA,

PARA ESTUDIAR LA APORTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA QUE PUEDE REALIZAR UN ACUÍFERO A UN RÍO, O, AL CONTRARIO, LA RECARGA QUE UN EMBALSE SUBTERRÁNEO PUEDE RECIBIR DE UN CURSO DE AGUA SUPERFICIAL, ES FUNDAMENTAL CONOCER EL TIPO DE CONEXIÓN HIDRÁULICA QUE SE PRESENTA ENTRE AMBOS,

EL TIPO DE CONEXIÓN HIDRÁULICA VENDRÁ DADO --- PRINCIPALMENTE POR DOS FACTORES: A) LA SITUACIÓN DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS PERMEABLES EN RELACIÓN CON EL CAUCE DEL RÍO; Y B) LA SITUACIÓN RELATIVA DE LOS NIVELES DEL RÍO Y DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN LA ZONA DEL ACUÍFERO CONTIGUA AL RÍO. EN LA FIGURA 12 DE ESTE CAPÍTULO, PUEDEN VERSE SEIS ESQUEMAS QUE SON ILUSTRATIVOS DE LA MAYOR PARTE DE LOS CASOS QUE PUEDEN PRESENTARSE EN LA REALIDAD,

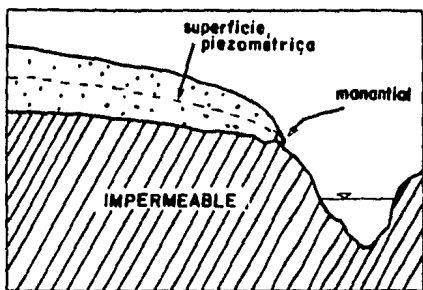
EN LA FIGURA 12.A SE REPRESENTA LA SITUACIÓN DE UN MANANTIAL CUYAS AGUAS VAN A PARAR A UN RÍO DESPUÉS DE AFLOTTAR EN EL TERRENO A UNA COTA MÁS ALTA QUE EL NIVEL DEL RÍO. EL ACUÍFERO QUE ALIMENTA AL MANANTIAL NO TIENE NINGUNA CONEXIÓN HIDRÁULICA CON EL RÍO; SIN EMBARGO, SI LA RECARGA DEL MANANTIAL SE EFECTUA A PARTIR DE LA INFILTRACIÓN DE LLUVIA CAÍDA EN LA MISMA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO, Y ESTA CUENCA NO ES MUY EXTENSA, ES PROBABLE QUE EL MANANTIAL REGISTRE UN AUMENTO DE SU CAUDAL POCOS DÍAS O SEMANAS DESPUÉS DE QUE EL RÍO REGISTRE UNA AVENIDA.

EN LA FIGURA 12.B, SE PRESENTA EL CASO DE UN RÍO EFLUENTE O DRENANTE. ÉSTA SITUACIÓN ES FRECUENTE EN LAS GRANDES LLANURAS ALUVIALES DE LAS ZONAS HÚMEDAS O DE AQUELLAS OTRAS QUE SIENDO ÁRIDAS O SEMIÁRIDAS, RECIBEN UNA RECARGA IM---

PORTANTE DEBIDA A LA INFILTRACIÓN DE CANALES, DE EXCEDENTES DEL AGUA APLICADA PARA REGADIOS, TAMBIÉN SE SUELE DAR UNA SITUACIÓN ANÁLOGA EN LOS VALLES MÁS PROFUNDOS DE LAS ZONAS CALCÁREAS. LA FIGURA 12.C ESQUEMATIZA EL CASO DE LOS RÍOS INFLUENTES O INFILTRANTES QUE, NO SÓLO NO RECIBEN NINGUNA APORTACIÓN SUBTERRÁNEA AUNQUE SU CAUCE ESTÉ EN TERRENOS PERMEABLES, SINO QUE PIERDEN - POR FILTRACIÓN PARTE DE SU CAUDAL. ESTE HECHO SE DEBE A QUE EL NIVEL DEL AGUA EN EL CAUCE ES MÁS ALTO QUE LA SUPERFICIE SATURADA DE LOS MATERIALES PERMEABLES CONTIGUOS. ESTE ESQUEMA ES TÍPICO DE ZONAS ÁRIDAS O SEMIÁRIDAS EN LAS QUE, MUCHAS VECES, LA -- INFILTRACIÓN DE AGUA A TRAVÉS DE LOS CAUCES DE LOS RÍOS (O DE -- CANALES SIN REVESTIR), CONSTITUYE LA PRINCIPAL FUENTE DE RECARGA DEL ACUÍFERO.

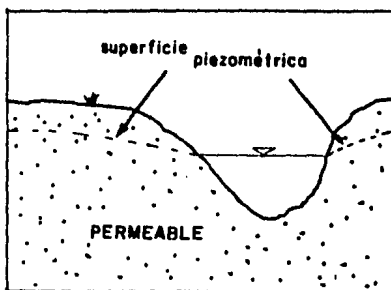
LA FIGURA 12-D, REPRESENTA LA SITUACIÓN NORMAL - DE LOS RÍOS EFLUENTES DURANTE LAS AVENIDAS, EN LAS CUALES, EL -- CAUDAL DE ORIGEN SUPERFICIAL SE INTRODUCE EN LAS MÁRGENES O RIBERAS DEL RÍO, QUE PASA A SER, DE EFLUENTE, A INFLUENTE.

POR ÚLTIMO EN LOS ESQUEMAS 12.E Y F, SE CONSIDERA EL CASO DE UN RÍO QUE RECIBE ALIMENTACIÓN SUBTERRÁNEA PROCEDENTE DE UN ACUÍFERO PROFUNDO CUYO NIVEL PIEZOMÉTRICO ES MUY SUPERIOR AL NIVEL DEL RÍO, Y POR TANTO, EL FLUJO SUBTERRÁNEO PRÁCTICAMENTE NO QUEDA AFECTADO POR LAS VARIACIONES DEL NIVEL DEL RÍO. EN EL ESQUEMA 12.E, EL RÍO SÓLO RECIBE UNA PARTE DEL FLUJO QUE PASA BAJO SU CAUCE, YA QUE EL RÍO SE SUPONE MUY POCO PENETRANTE, Y POR LO TANTO EL AGUA FLUYE CON DIFICULTAD HACIA EL -- MISMO; EN EL ÚLTIMO ESQUEMA SE SUPONE QUE TODA LA DESCARGA DEL ACUÍFERO VA A PARAR AL CAUCE DEL RÍO. POR LO QUE ES MUY CONVENIENTE NO SÓLO SABER LA SITUACIÓN DE LOS PRINCIPALES ACUÍFEROS DE LA CUENCA QUE SE ESTUDIA EN RELACIÓN CON EL CAUCE DEL RÍO, - SINO TAMBIÉN, CONOCER AL MENOS DE MODO APROXIMADO, LA FORMA DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA DE CADA ACUÍFERO.



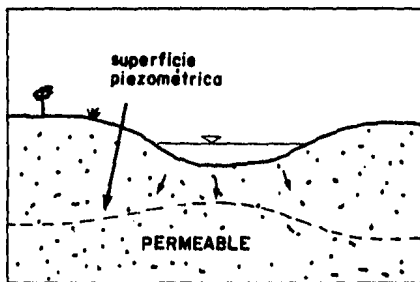
(A)

Sin conexión hidráulica



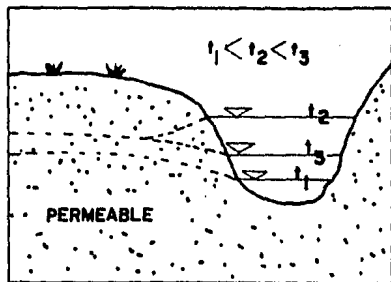
(B)

Río efluente



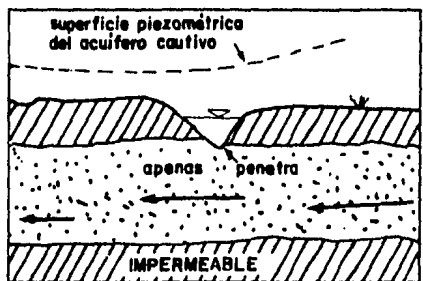
(C)

Río influente



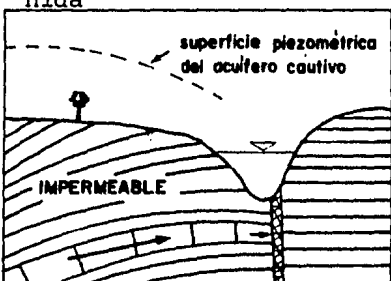
(D)

Cambio de efluente a influente durante una avenida



(E)

Río alimentado por un acuífero cautivo que esta conectado con el río.



(F)

Río alimentado por un acuífero cautivo profundo a través de una zona de fractura.

FIG. 12.- ESQUEMAS DE TIPOS DE CONEXIÓN HIDRÁULICA ENTRE UN RÍO Y UN ACUÍFERO.

POR LO GENERAL PUEDE ASEGURARSE QUE EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE EXTENSIÓN REDUCIDA O MODERADA (HASTA UNOS POCOS MILES DE km^2), TODO EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL ALCANZA LOS CURSOS DE AGUA Y SALE DE LA CUENCA A LOS POCOS DÍAS DE PRODUCIRSE UNA LLUVIA O TORMENTA, DURANTE EL RESTO DEL TIEMPO, SI LOS RÍOS LLEVAN AGUA SE DEBE AL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO O AL SUPERFICIAL DIFERIDO, SIN EMBARGO EN CUENCAS DE GRANDES DIMENSIONES EN ÉPOCAS DE LLUVIA ES NECESARIO DETERMINAR EL PAPEL QUE PUEDE REPRESENTAR EL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO DEL TOTAL PRODUCIDO POR UNA TORMENTA, EL ANÁLISIS DEL HIDROGRAMA NOS SERÁ DE GRAN AYUDA EN ESTE SENTIDO.

EL HIDROGRAMA REPRESENTA LA DISTRIBUCIÓN DEL ESCURRIMIENTO TOTAL QUE PASA POR UNA DETERMINADA ESTACIÓN DE AFOROS DEL RÍO. SE SABE QUE EN UN MOMENTO DADO, EL ESCURRIMIENTO TOTAL SE COMPONE DE UN ESCURRIMIENTO DIRECTO (ED) UN ESCURRIMIENTO HIPODÉRMICO QUE ES UNA FRACCIÓN DE LAS AGUAS INFILTRADAS QUE CIRCULA LATERALMENTE POR LAS CAPAS SUPERFICIALES DEL SUELO (EH) Y EL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO (ES). EN LA PRÁCTICA RESULTA IMPOSIBLE DIBUJAR EXACTAMENTE LAS CURVAS QUE SEPARAN ESTOS TRES COMPONENTES DEL HIDROGRAMA, SIN EMBARGO, SE HAN PROPUUESTO DIVERSOS PROCEDIMIENTOS EMPÍRICOS PARA SU DESGLOSE.

PASADA LA PUNTA DEL HIDROGRAMA SE INICIA LA CURVA DE DESCENSO QUE AL PRINCIPIO SE DEBE AL APORTE CONJUNTO DE LOS TRES ESCURRIMIENTOS YA CITADOS, PASADO UN CIERTO TIEMPO, SE ANULAN PRIMERO EL ESCURRIMIENTO DIRECTO Y DESPUÉS EL HIPODÉRMICO, QUEDÁNDO EL CAUDAL REDUCIDO A LOS APORTES DEBIDOS AL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO. ENTONCES RECIBE EL NOMBRE DE CURVA DE AGOTAMIENTO, DICHA CURVA REPRESENTA DISMINUCIÓN DEL AGUA ALMACENADA EN LOS ACUÍFEROS.

EL PROCESO FÍSICO DE LA LIBERACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA SIGUE UNA LEY EXPONENCIAL DE LA FORMA:

$$Q_T = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

ESTE PROCESO PUEDE SER SIMULADO MEDIANTE UN RECIPIENTE FICTICIO (FIGURA 13), PROVISTO EN SU PARTE INFERIOR DE UN TAPÓN POROSO DE SECCIÓN S' Y SU LONGITUD L . SEA S LA SECCIÓN DEL DEPÓSITO Y h LA ALTURA DE AGUA. AL FLUJO A TRAVÉS DEL TAPÓN POROSO LE PODEMOS APLICAR LA LEY DE DARCY, SUPONIENDO QUE SU PERMEABILIDAD ES DE:

$$q = \frac{h}{L} S' = \text{CAUDAL QUE SALE}$$

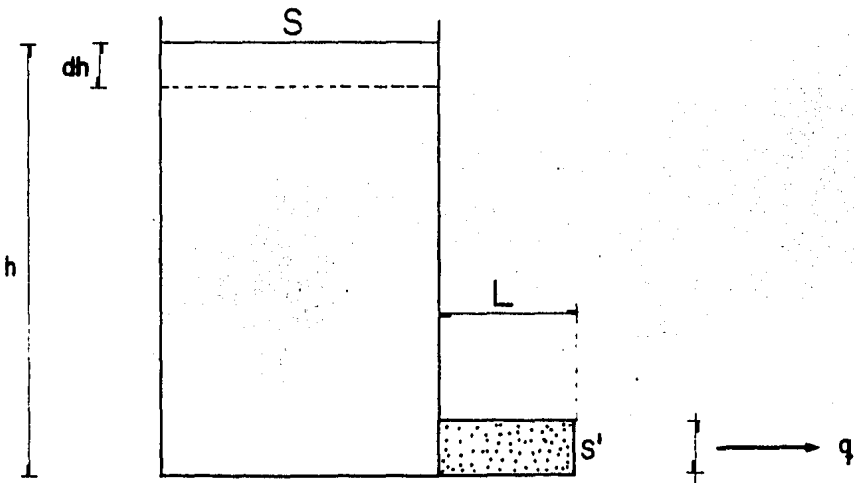


FIG. 13.- ESQUEMA DE DRENAJE DE UN ACUÍFERO.

SI EN EL TIEMPO dt EL AGUA DESCIENDE dh EN EL DEPÓSITO, SE TIENE:

$$dq = k \frac{S'}{L} dh \quad (1)$$

$$S dh = -q \cdot dt \quad (2)$$

ELIMINANDO dh , RESULTA:

$$\frac{dq}{q} = -\alpha dt \quad (3)$$

SIENDO:

$$\alpha = \frac{k S'}{S L} = \text{CONSTANTE}$$

INTEGRANDO (3) RESULTA:

$$q = q_0 \cdot e^{-\alpha (t - t_0)} \quad (4)$$

SIENDO t_0 EL INSTANTE EN QUE $q = q_0$. SI $t_0 = 0$, QUEDA:

$$q = q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (5)$$

MÉTODOS BASADOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DEL HIDROGRAMA.-

EN LA FIGURA 14, SE REPRESENTA EL HIDROGRAMA DEL CAUDAL DE UN RÍO CORRESPONDIENTE A UNA TORMENTA. EN LOS MOMENTOS ANTERIORES A LA LLUVIA SE SUPONE QUE TODA EL AGUA ES ORIGEN SUBTERRÁNEO.

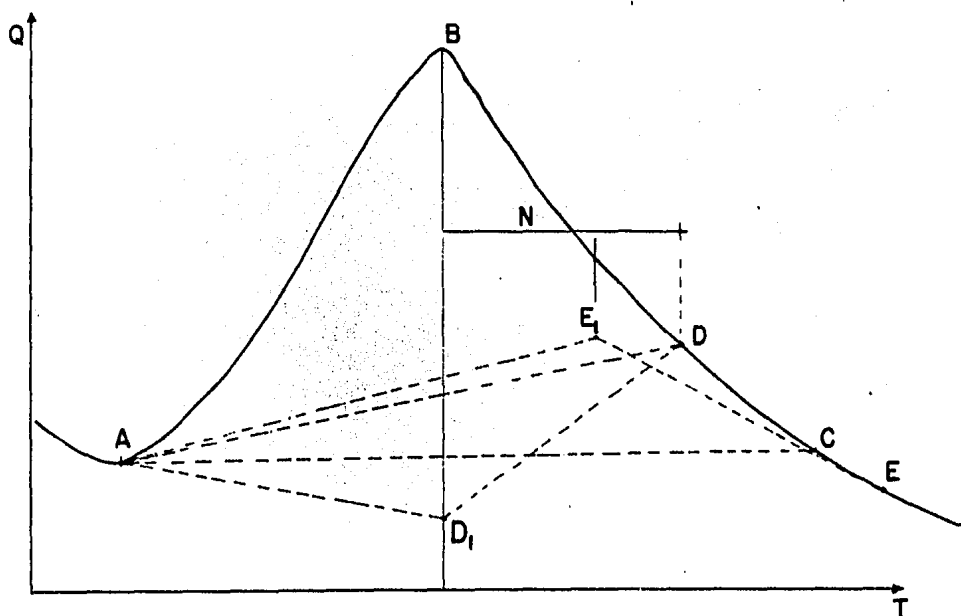


FIG. 14.- HIDROGRAMA DE ESCURRIMIENTO CORRESPONDIENTE A UNA TORMENTA. MÉTODOS DE SEPARACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO.

LA PRÁCTICA COMÚN ES SEPARAR EL CAUDAL QUE REPRESENTA EL HIDROGRAMA EN SÓLO DOS COMPONENTES, ENGLOBANDO EN EL ESCURRIMIENTO DIRECTO LA PRECIPITACIÓN SOBRE EL CAUCE Y EL ESCURRIMIENTO HIPODÉRMICO.

A) EL PROCEDIMIENTO MÁS SENCILLO PARA SEPARAR EL FLUJO BÁSICO, ES TRAZAR UNA LÍNEA RECTA HORIZONTAL DESDE EL PUNTO A HASTA EL PUNTO C; EL ESCURRIMIENTO DIRECTO O SUPERFICIAL CORRESPONDIENTE A LA TORMENTA ESTARÍA REPRESENTADO POR EL ÁREA ABC. ESTE PROCEDIMIENTO EQUIVALE A SUPONER QUE EL FLUJO BÁSICO SE MANTIENE CONSTANTE HASTA QUE HA DESAGUADO TODO EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

b) OTRO PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR LINSLEY - Y COLABORADORES, CONSISTE EN PROLONGAR LA CURVA DE AGOTAMIENTO - HASTA EL PUNTO D₁ SITUADO DEBAJO DE LA CRESTA Y UNIR ESTE PUNTO CON EL D DEL HIDROGRAMA, SITUADO N DÍAS MÁS TARDE QUE LA CRESTA, SIENDO $N = 0,827 A^{0.2}$ Y A LA SUPERFICIE DE LA CUENCA EN km², POR EJEMPLO, N = 2,1, 3,3, 5,3 DÍAS PARA A = 100, 1000 Y 10000 km² - RESPECTIVAMENTE. ADVIERTEN, NO OBSTANTE, DICHS AUTORES QUE EL - VALOR DE N SE DETERMINA MEJOR MEDIANTE, LA COMPARACIÓN DE VARIOS HIDROGRAMAS DEL RÍO. OTROS AUTORES COMO TOEBES Y DURIVAEV UNEN - DIRECTAMENTE EL PUNTO D CON EL A.

c) UN TERCER PROCEDIMIENTO ES EXTRAPOLAR LA - CURVA DE AGOTAMIENTO DESDE UN PUNTO E, HASTA UN PUNTO E₁. DETERMINADO Y UNIR ESTE PUNTO E₁ CON EL PUNTO A. ESTE PROCEDIMIENTO, PUEDE SER ADECUADO EN LOS CASOS EN LOS QUE LA RECARGA DE LA LLUVIA SOBRE EL ACUÍFERO ALCANZA PRONTO EL RÍO. PRESUPONE LA EXISTENCIA DE UNA CURVA DE AGOTAMIENTO ÚNICA DEL ACUÍFERO Y QUE ESTA CURVA RESPONDA A LA CONOCIDA ECUACIÓN -----

$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$, , , , (5). LA SITUACIÓN DEL PUNTO E₁ - SEGÚN ---- LINSLEY - DEBE CORRESPONDER CON EL PUNTO DE INFLEXIÓN DEL TRAMO DESCENDENTE DEL HIDROGRAMA.

METODO BASADO EN EL ESTUDIO DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL --- AGUA.

ALGUNOS INVESTIGADORES - ENTRE ELLOS LA SALA, (1967) Y PINDER Y JONES (1969) - HAN PROPUESTO Y APLICADO UN -- PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE FLUJO DE BASE - DEL CAUDAL DEL RÍO, TENIENDO EN CUENTA LAS VARIACIONES EN LA -- COMPOSICIÓN QUÍMICA, O VICEVERSA, DEDUCIR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA, SI SE CONOCE LA PROPORCIÓN DE LOS DOS COMPONENTES DEL FLUJO.

EL PROCEDIMIENTO SE BASA EN LA ECUACIÓN SIGUIENTE, QUE PUEDE APLICARSE A CADA ION O AL TOTAL DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS,

$$C_T Q_T = C_S Q_S + C_D Q_D \quad (6)$$

EN LA QUE:

C_T = CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL ESCURRIMIENTO TOTAL,

C_S = CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO,

C_D = CONCENTRACIÓN IÓNICA DEL ESCURRIMIENTO DIRECTO O SUPERFICIAL,

Q_T = CAUDAL DEL ESCURRIMIENTO TOTAL,

Q_S = CAUDAL DEL ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO,

Q_D = CAUDAL DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL O DIRECTO,

ESTA ECUACIÓN ES VÁLIDA SIEMPRE QUE NO SE PRODUZCAN PRECIPITACIONES QUÍMICAS AL MEZCLARSE LOS DOS TIPOS DE AGUA, Y PUEDE ESCRIBIRSE TAMBIÉN EN LA FORMA SIGUIENTE:

$$Q_S = Q_T \frac{C_T - C_D}{C_S - C_D} \quad (7)$$

YA QUE:

$$Q_T = Q_S + Q_D \quad (8)$$

SE SUELE CONSIDERAR QUE LAS MUESTRAS DE AGUA DEL RÍO, TOMADAS EN LOS CAUDALES MÍNIMOS O PERÍODOS DE ESTIAJE, CORRESPONDEN AL DRENAJE DEL EMBALSE SUBTERRÁNEO Y, POR TANTO, SIRVE PARA DETERMINAR C_S QUE SUELE SER BASTANTE CONSTANTE,

LA DETERMINACIÓN DE C_D PUEDE PLANTEAR MÁS PROBLEMAS. EN ALGUNOS CASOS PUEDE SER REPRESENTATIVA DE LA CALIDAD DE PEQUEÑOS RÍOS EFÍMEROS EN TERRENOS IMPERMEABLES, ES DECIR, - SIN APORTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. EN OTRAS OCASIONES, PUEDE SER REPRESENTATIVA LA COMPOSICIÓN DEL AGUA DEL RÍO DURANTE - LAS CRECIDAS, SI EL RÍO PASA DE SER EFLUENTE A INFLUENTE, AL AUMENTAR SU NIVEL. CONOCIDAS O ESTIMADAS LAS CONCENTRACIONES Y EL CAUDAL O APORTACIÓN TOTAL Q_T , SE PUEDE CALCULAR Q_S APLICANDO LA ECUACIÓN (7).

CAPITULO III

BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES,

EL CONOCIMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS Y DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA HACIA LAS CAPTACIONES Y REBOSADEROS NATURALES O A PARTIR DE LOS LUGARES DE RECARGA ES IMPRESCINDIBLE, SOBRE TODO PARA ACLARAR CONCEPTOS, POR LO QUE SE HACE CONVENIENTE CONSIDERAR A LOS ACUÍFEROS COMO SISTEMAS FÍSICOS QUE POSEEN UN CIERTO FUNCIONAMIENTO, REGULADO POR LA CARGA, EXTRACCIONES, ETC., Y QUE DEBEN POSEER UNAR CIERTAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LAS CUALES DEPENDA ESE FUNCIONAMIENTO. ASÍ, ESTAS CARACTERÍSTICAS O PARÁMETROS PERMITEN DEFINIR Y EN ALGUNOS CASOS, PREDECIR, EL FUNCIONAMIENTO O RESPUESTA DEL ACUÍFERO FRENTE A UNAS DETERMINADAS ACCIONES EXTERIORES. ESTOS PARÁMETROS SON, CONCRETAMENTE, LA POROSIDAD, LA PERMEABILIDAD, EL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO Y LA TRANSMISIBILIDAD AUNQUE ESTA ÚLTIMA NO ES SINO UN PRODUCTO DE LA PERMEABILIDAD POR UN ESPESOR SATURADO.

a).- POROSIDAD.-

LA POROSIDAD DE UN MATERIAL VIENE EXPRESADA -- POR LA RELACIÓN ENTRE EL VOLUMEN DE SU PARTE VACÍA U OCUPADA -- POR AIRE Y/O AGUA Y SU VOLUMEN TOTAL.

SI SE CONSIDERA UN CIERTO VOLUMEN DE MUESTRA -- EN UNA ROCA O SUELO CUALESQUIERA SE PUEDE DISTINGUIR:

A).- VOLUMEN DE LA PARTE SÓLIDA (V_S)

B).- VOLUMEN DE HUECOS (V_V)

C).- VOLUMEN TOTAL ($V_T = V_V + V_S$)

EN ESTAS CONDICIONES, LA POROSIDAD n SERÍA:

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

Y EL CONCEPTO EN SU DEFINICIÓN; COMO LA FRACCIÓN DE ESPACIOS VACÍOS QUE CONTIENE UN MATERIAL SÓLIDO RESPECTO AL VOLUMEN TOTAL.

EN LA PRÁCTICA NO ES FRECUENTE ENCONTRAR UNIFORMIDAD EN LOS GRANOS, YA QUE POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN SE ESTABLECE LA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL EN CUESTIÓN, Y LA DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD A PARTIR DE SU GRANULOMETRÍA ES MUY DIFÍCIL DE ESTABLECER SI SE CONSIDERA QUE ALGUNO DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA POROSIDAD (LA CEMENTACIÓN, POR EJEMPLO), NO QUEDAN REFLEJADOS EN LA GRANULOMETRÍA, LO QUE HACE QUE LOS VALORES HALLADOS A TRAVÉS DE ENSAYOS DE ESTE TIPO DEBEN TOMARSE CON MUCHA RESERVA. SIN EMBARGO, EL VOLUMEN DE AGUA CONTENIDO EN UN SUELO, LIBERADA POR LA ACCIÓN DE LA GRAVEDAD Y QUE SE DENOMINA V_E (VOLUMEN DE AGUA LIBRE) ESTA DETERMINADO POR LA POROSIDAD EFICAZ (n_e), ES DECIR:

$$n_e = \frac{V_E}{V_T} \cdot 100$$

ESTA POROSIDAD EFICAZ NO REPRESENTA MÁS QUE UNA PORCIÓN A MENUDO PEQUEÑA DE LA POROSIDAD TOTAL. LA OBSERVACIÓN ES IMPORTANTE PUESTO QUE LAS RESERVAS ÚTILES DE UN MATERIAL ACUÍFERO ESTAN CONDICIONADAS POR LA POROSIDAD EFICAZ.

B).- PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.-

EN 1856 EL INGENIERO FRANCÉS HENRY DARCY PUBLICÓ UNA SERIE DE EXPERIENCIAS EN DONDE ESTABLECE LA LEY QUE REGULA EL MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS MIDIENDO EL GASTO

Q EN FUNCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS Y OBSERVÓ QUE (FIGURA 15), ÉSTE EQUIVALIA A:

$$Q = k A \frac{h}{L}$$

SIENDO k , EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD; A EL ÁREA DE SECCIÓN, A TRAVÉS DE LA CUAL SE PRODUCE EL FLUJO DEL AGUA; h LA DIFERENCIA DE CARGA ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA DEL RECIPIENTE Y L - EL RECORRIDO QUE DEBE REALIZAR EL AGUA A TRAVÉS DEL MEDIO PERMEABLE.

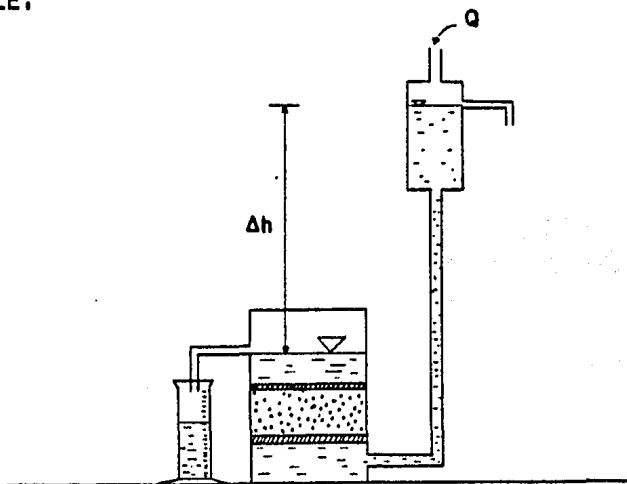


FIG. 15.- EXPERIMENTO DE DARCY

SI TENEMOS EN CUENTA QUE:

$$\frac{Q}{A} = v$$

SIENDO v LA VELOCIDAD MEDIA, RESULTA:

$$\frac{Q}{A} = v = k \frac{h}{L}$$

LLAMANDO AL GRADIENTE HIDRÁULICO $\frac{h}{L} = i$, RESULTA:

$$v = k \cdot i ; \quad k = \frac{v}{i}$$

ESTE PARÁMETRO K, Ó COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD, TIENE LAS DIMENSIONES DE UNA VELOCIDAD, YA QUE LA ECUACIÓN DIMENSIONAL ES:

$$k = \frac{L^3/T}{(L/L)L^2} = L/T$$

Y SE DEFINE COMO EL CAUDAL QUE PASA POR UNA SECCIÓN UNITARIA -- DEL ACUÍFERO BAJO UN GRADIENTE TAMBIÉN UNITARIO, A UNA TEMPERATURA FIJA O DETERMINADA.

LOS FACTORES QUE DETERMINAN LA PERMEABILIDAD -- PUEDEN SER INTERNOS O EXTERNOS. LOS INTERNOS SON LOS PROPIOS -- DEL ACUÍFERO Y DEPENDEN DEL TAMAÑO DE LOS POROS. ASÍ, VEMOS QUE DOS ACUÍFEROS QUE ESTUVIERAN FORMADOS POR ESFERAS DE 0.1 m Y -- 10^{-3} m, RESPECTIVAMENTE; PUEDEN TENER IGUAL POROSIDAD, PERO -- SIEMPRE TENDRÁN DIFERENTE PERMEABILIDAD; SI EL RESTO DE LAS -- CONDICIONES SE MANTIENEN, SIEMPRE TENDRÁ MAYOR PERMEABILIDAD -- EL MEDIO QUE TENGA MAYOR DIÁMETRO DE PARTÍCULAS.

LOS FACTORES EXTERNOS SON LOS QUE DEPENDEN DEL FLUÍDO Y SON FUNDAMENTALMENTE SU VISCOSIDAD Y SU PESO ESPECÍFICO, AMBOS DEPENDEN DE LA TEMPERATURA, POR LO QUE EN CASOS ESPECIALES DEBE TENERSE EN CUENTA ÉSTA SOBRE TODO POR LA NOTABLE -- INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN LA PERMEABILIDAD.

c).- COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.-

ES EL VOLUMEN DE AGUA LIBERADO POR UNA COLUMNA DE ACUÍFERO DE ALTURA IGUAL AL ESPESOR DEL MISMO Y DE SEC--

CIÓN UNITARIA SI SE PRODUCE UN DESCENSO UNITARIO DEL NIVEL --- PIEZOMÉTRICO O DE CARGA HIDRÁULICA. EN ACUÍFEROS LIBRES EL --- COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO COINCIDE CON LA POROSIDAD EFICAZ Y SU VALOR SUELE OSCILAR ENTRE 0,01 Y 0,4 SIENDO EL INTERVALO MÁS FRECUENTE DE 0,1 A 0,3. EN ACUÍFEROS CONFINADOS Y SEMI-- CONFINADOS EL VALOR DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO - QUE SE REPRESENTA COMO "S" Y ES ADIMENSIONAL - ES EN COMPARACIÓN BAS-- TANTE INFERIOR AL DE LA POROSIDAD EFICAZ, CAYENDO EN EL CAMPO - DE LAS MILÉSIMAS A CIENMILÉSIMAS EN CONDICIONES ARTESIANAS O -- CAUTIVAS. (10^{-3} A 10^{-5}).

d).- TRANSMISIVIDAD.-

LA LEY DE DARCY HA SIDO EXPRESADA COMO -----
 $Q = kAi$, AHORA BIEN, SI LA SECCIÓN A, IGUAL A LA DEL ACUÍFERO, - TIENE UNA LONGITUD L Y UNA ALTURA b , TENDREMOS.

$$A = b \cdot L$$

Y LA LEY DE DARCY SE PUEDE ESCRIBIR COMO:

$$Q = k \cdot b \cdot i \cdot L$$

AL PRODUCTO $k \cdot b$ SE LE LLAMA TRANSMISIVIDAD Y - SE DESIGNA POR T, QUEDANDO LA LEY DE DARCY EN LA FORMA:

$$Q = T \cdot i \cdot L$$

EL CONCEPTO DE TRANSMISIVIDAD FUE INTRODUCIDO POR THEIS EN 1935, Y SE DEFINE COMO EL CAUDAL QUE SE FILTRA A TRAVÉS DE UNA FRANJA VERTICAL DE TERRENO, DE ANCHO UNITARIO Y DE ALTURA IGUAL A LA DEL MANTO PERMEABLE SATURADO BAJO UN GRADIENTE UNITARIO A UNA TEMPERATURA FIJA DETERMINADA.

SUS DIMENSIONES SON LAS DE UNA VELOCIDAD POR --
UNA LONGITUD, ES DECIR:

$$(T) = [L]^2 [T]^{-1}$$

EXPRESÁNDOSE EN CONSECUENCIA EN $m^2/\text{día}$ ó cm^2/s ,

ECUACION DE BALANCE.

LA ECUACIÓN DE BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, -
ES LA MISMA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD, BASADA EN EL AXIOMA DE ---
LAVOISIER DE QUE "NADA SE CREA NI SE DESTRUYE", Y SE EXPRESA:

$$\text{ENTRADAS} = \text{SALIDAS} \pm \text{VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO.}$$

Y QUE EN TÉRMINOS DE GEOHIDROLOGÍA SE ESCRIBE:

$$\text{RECARGAS} = \text{DESCARGAS} \pm \text{INCREMENTO DE ALMACENAMIENTO.}$$

PARA DETERMINAR LA RECARGA DE UNA CUENCA SUB-
TERRÁNEA, ES COMÚN REALIZAR BALANCES GLOBALES INCLUYENDO PRO-
CESOS SUPERFICIALES COMO LA LLUVÍA Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PA-
RA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN. LA MAGNITUD DE ÉSTOS TÉRMINOS
EN LA ECUACIÓN HIDROLÓGICA ES DE UN ORDEN SUPERIOR AL TÉRMINO
QUE SE QUIERE CALCULAR, POR LO QUE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN -
EL VALOR DE LA RECARGA ES MUY PRECARIA, TANTO QUE CONDUCE A -
CONCLUSIONES POR COMPLETO FUERA DE LA REALIDAD.

Y COMO SE REQUIERE CONOCER CON MAYOR PRECI---
SIÓN LA RECARGA DE ACUÍFEROS, ES NECESARIO ESTABLECER ECUACIO-
NES DE BALANCE LOCAL CON VOLÚMENES DE AGUA LIGADOS DIRECTAMEN-
TE AL ACUÍFERO. POR LO QUE EL TÉRMINO DE LAS DESCARGAS EN LA -
ECUACIÓN DE BALANCE, INCLUIRÁ A ELEMENTOS TALES COMO MANANTIA-

LES (M), EVAPOTRANSPIRACIÓN (E_{vt}), CAUDAL O GASTO BASE (D_b), --
 FLUJO SUBTERRÁNEO (S_h) Y BOMBEO (B), QUEDANDO:

$$R = M + E_{vt} + D_b \pm S_h + B \pm \Delta V$$

UN MANANTIAL PUEDE DEFINIRSE COMO UN PUNTO O --
 ZONA DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO EN LA QUE, DE MODO NATURAL, --
 FLUYE A LA SUPERFICIE UNA CANTIDAD APRECIABLE DE AGUA, PROCEDEN-
 TE DE UN EMBALSE SUBTERRÁNEO. LOS MANANTIALES SON, PUES, EN --
 CIERTO MODO, ALIVIADEROS O DESAGUES POR LOS QUE SALE LA INFILTRA
 CIÓN O RECARGA QUE RECIBEN LOS ACUÍFEROS.

EL ESTUDIO DE ESTE TÉRMINO EN LA ECUACIÓN DE --
 BALANCE NOS CONDUCE A CONOCER EXCLUSIVAMENTE SU LOCALIZACIÓN Y
 MAGNITUD DE LA DESCARGA. MEDIANTE MAPAS TOPOGRÁFICOS, ESTUDIOS
 LITOLÓGICOS Y DE LA ESTRUCTURA DE LA ZONA QUE PUEDEN DAR INDICA
 CIONES MUY INTERESANTES SOBRE ESA LOCALIZACIÓN Y CAUDAL DE LOS
 MANANTIALES O SI SE CONOCEN ESTOS DATOS, SOBRE LAS CARACTERÍS--
 TICAS GEOMÉTRICAS E HIDROLÓGICAS DEL EMBALSE SUBTERRÁNEO QUE --
 ALIMENTA ESE MANANTIAL. ASÍ, POR EJEMPLO, EN ZONAS DE GEOLOGÍA
 UNIFORME, LA EXISTENCIA DE MANANTIALES PEQUEÑOS Y ABUNDANTES EN
 LAS LADERAS DE LOS VALLES O COLINAS, INDICA GENERALMENTE UNA --
 ZONA SATURADA POCO PROFUNDA Y UNA PERMEABILIDAD PEQUEÑA; POR EL
 CONTRARIO, LOS MANANTIALES GRANDES Y SITUADOS EN EL FONDO DE --
 LOS VALLES, SUELEN INDICAR UNA PERMEABILIDAD GRANDE Y UN NIVEL
 SUPERIOR DE LA ZONA SATURADA.

EN LO QUE SE REFIERE AL CAUDAL MEDIO QUE TIE--
 NEN LOS MANANTIALES, HA TENIDO CIERTA ACEPTACIÓN EL SISTEMA --
 PROPUESTO POR MEINZER EN 1923, QUE CLASIFICA LOS MANANTIALES --
 EN LOS OCHO GRUPOS SIGUIENTES:

PRIMERO	SUPERIORES A $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$
SEGUNDO	ENTRE 0.28 Y $2.80 \text{ m}^3/\text{s}$
TERCERO	ENTRE 28 Y 280 l/s

CUARTO	ENTRE 6,3 Y 28	l/s
QUINTO	ENTRE 40 Y 400	l/min
SEXTO	ENTRE 4 Y 40	l/min
SEPTIMO	ENTRE 0,5 Y 4	l/min
OCTAVO	ENTRE 0,5	l/min

LO NORMAL ES QUE LOS MANANTIALES SURJAN EN ---
 AQUELLAS DEPRESIONES O VALLES EN LOS QUE EL LÍMITE SUPERIOR DE
 LA ZONA SATURADA ALCANZA LA SUPERFICIE TOPOGRÁFICA (FIGURA 16),
 CON FRECUENCIA, EN ESTOS CASOS, CUANDO LA DEPRESIÓN TOPOGRÁFICA
 ES UN VALLE, LOS MANANTIALES DE AGUAS ARRIBA DAN ORIGEN A UN --
 CURSO PERMANENTE, DE MODO QUE LOS MANANTIALES DE AGUAS ABAJO --
 SUELEN SER SUBFLUVIALES.

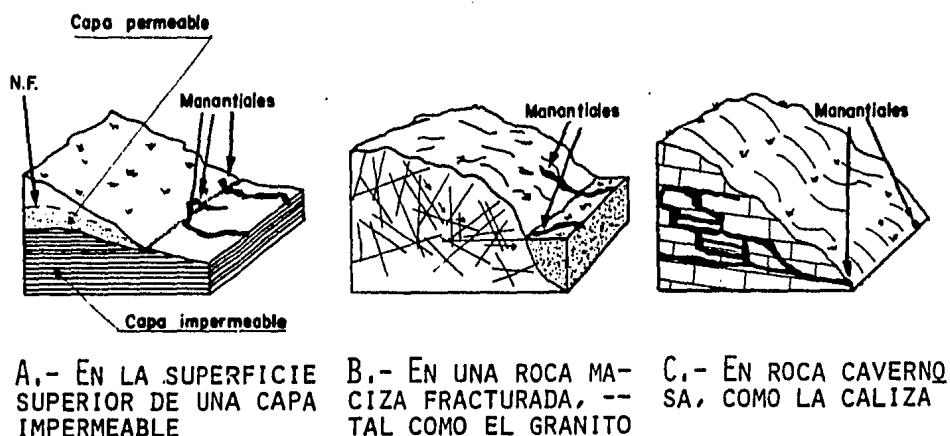


FIG. 16.- MANANTIALES, TRES LOCALIZACIONES COMUNES.

EL CAUDAL DE LA MAYORÍA DE LOS MANANTIALES VA
 RÍA CONSIDERABLEMENTE, PERO EL DE ALGUNOS ES CASI CONSTANTE. --
 LAS VARIACIONES RESPONDEN FUNDAMENTALMENTE A LOS CAMBIOS EN --

LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS DEL EMBALSE SUBTERRÁNEO DRENADO POR EL MANANTIAL, QUE A SU VEZ, DEPENDEN DE LAS RELACIONES ENTRE LA RECARGA Y LA DESCARGA, PUEDE DECIRSE QUE CUALQUIER CAUSA QUE DÉ -- LUGAR A UNA FLUCTUACIÓN DE NIVEL PIEZOMÉTRICO DEL AGUA CONTENIDA EN UN EMBALSE SUBTERRÁNEO, PUEDE ORIGINAR TAMBIÉN UN CAMBIO EN EL CAUDAL DE LOS MANANTIALES ALIMENTADOS POR DICHO EMBALSE.

LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DESTACA UNA IMPORTANCIA RELATIVA RESPECTO AL TOTAL DEL AGUA RECIBIDA POR UNA ZONA, MUY FRECUENTEMENTE, ES DEL ORDEN DEL 70% DE ÉSTA Y PUEDE LLEGAR EN ALGUNOS LUGARES AL 90%. PARA EFECTOS DE ESTIMAR LAS PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN, EL TÉRMINO SE ENTENDERÁ EN EL SENTIDO AMPLIO, INCLUYENDO LA SUBLIMACIÓN. NO INCLUYE, EN CAMBIO, LA EVAPORACIÓN DE GOTAS DE AGUA EN SU RECORRIDO DESCENDENTE ANTES DE LLEGAR A LA SUPERFICIE DE LA TIERRA PUES AQUELLAS TAMPOCO SE HABRÁN CONTABILIZADO COMO APORTACIÓN (PRECIPITACIÓN) EN EL BALANCE HÍDRICO. LUEGO ENTONCES HABRÁ QUE ADICIONAR LAS PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE AGUA LIBRE, A LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.

ESTE TEMA, COMO EL RELACIONADO CON EL GASTO BASE - ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO -, SON TRATADOS CON MÁS DETALLE EN EL CAPÍTULO II DE ESTA TESIS.

EL FLUJO SUBTERRÁNEO ES REFERIDO A LA CANTIDAD DE AGUA QUE ENTRA O SALE DE OTRO ACUÍFERO HACIA EL DE ESTUDIO. EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE DIMENSIONES MODERADAS O PEQUEÑAS, LA GEOLOGÍA PUEDE JUGAR UN PAPEL IMPORTANTE AL HACER QUE EXISTAN ESTAS COMUNICACIONES SUBTERRÁNEAS ENTRE CUENCAS PRÓXIMAS, PUES NO COINCIDEN LAS DIVISIONES DE DICHAS CUENCAS SUBTERRÁNEAS CON LAS SUPERFICIALES. AL RESPECTO SE PUEDE TOMAR LA DETERMINACIÓN SIMPLIFICATORIA PARA LA ECUACIÓN DE BALANCE HECHA POR MARKOVA (1970), CONSIDERANDO QUE ESTAS COMUNICACIONES SUBTERRÁNEAS NO SON SIGNIFICATIVAS CUANDO LAS CUENCAS TIENEN SUPERFICIES SUPERIORES A 2000 km², LO QUE NULIFICA EL TÉRMINO EN LA ECUACIÓN.

EL TÉRMINO REFERIDO A BOMBEO EN LA ECUACIÓN DE BALANCE, SE UTILIZA FUNDAMENTALMENTE PARA CUANTIFICAR EL VOLUMEN DE AGUA QUE SE EXTRAE DE LA CUENCA POR ESTE MEDIO,

ES NECESARIO CONOCER LOS DISPOSITIVOS DE AFORO PARA LA DETERMINACIÓN DE ESTE VOLUMEN, EN ZONAS QUE ESTAN DOTADAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO Y ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE NO EXISTE MUCHO PROBLEMA, PUES LA PLANTA, SABE DE QUE GASTO ESTÁ ABASTECIENDO A LA POBLACIÓN; EL PROBLEMA SE PRESENTA EN LAS ZONAS DE RIEGO A BASE DE BOMBEO YA QUE NO SE CUENTA (AQUÍ EN MÉXICO) CON MECANISMOS CONFIABLES DE AFORO, AUNQUE ESTAN LOS MEDIDORES, QUE SON TUBOS ADAPTADOS AL POZO Y QUE POR MEDIO DE HÉLICES O PALETAS VAN CONTANDO EL VOLUMEN EXTRAÍDO, AÚN ASÍ EXISTIRÁN EN LA ZONA UN BUEN NÚMERO DE POZOS QUE NO CUENTEN CON ESTOS DISPOSITIVOS Y POR LO TANTO LA CUANTIFICACIÓN ESTARÁ FALSEADA.

DICHOS MEDIDORES, TAMBIÉN, PUEDEN SER ALTERADOS POR ALGUNOS TRUCOS QUE UTILIZAN LOS USUARIOS, LO CUAL FALSIFICARÍA LAS MEDIDAS Y NO SERÍA ALGO MUY DIGNO DE TOMARSE EN CUENTA PARA EL CÁLCULO, EN LA ECUACIÓN DE BALANCE.

UN MÉTODO ORTODOXO PERO MÁS EFECTIVO ES EL SABER QUE TIPO DE CULTIVOS SE SEMBRARON, Y DETERMINAR EL USO CONSUNTIVO, O SEA LA LÁMINA DE AGUA UTILIZADA EN EL PERÍODO VEGETATIVO DE LA PLANTA SEMBRADA PARA SU DESARROLLO TOTAL,

EN EL PRESENTE TRABAJO, NO SE TRATAN LAS SOLUCIONES QUE PROPORCIONA LA HIDRÁULICA DE POZOS VISTAS EN MATERIAS ANTERIORES, (LOS ESTUDIOS REFERENTES AL MOVIMIENTO DEL AGUA HACIA LAS CAPTACIONES EN SUS PRIMERAS APLICACIONES SE REALIZARON A FINALES DEL SIGLO PASADO Y LAS PRINCIPALES APORTACIONES FUERON DEBIDAS AL ALEMÁN THIEM, AL FRANCÉS DUPUIT Y AL RUSSO LEMBKE, EL ESTUDIO DEL RÉGIMEN NO PERMANENTE FUE RESUELTO SATISFACTORIAMENTE EN 1935 POR EL NORTEAMERICANO THEIS, INTRODUJO LA FÓRMULA DE SU NOMBRE Y POSTERIORMENTE SU COMPATRIOTA -

JACOB LA APLICÓ A MUCHAS SITUACIONES REALES); SIN EMBARGO, SE COMENTARÁN ALGUNOS ASPECTOS RELEVANTES SOBRE EL TIPO DE ENSAYOS, Y ASÍ OBTENER MÉTODOS QUE PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS TALES QUE COMPLEMENTEN, SUSTITUYAN O MEJOREN LA COMPRESIÓN Y EL TRATAMIENTO DE LA ECUACIÓN DE BALANCE, ASÍ MISMO DE LA TOMA DE MEDIDAS Y AJUSTES DEL GASTO DE BOMBEO,

TODO DISPOSITIVO QUE PERMITA EXTRAER EL AGUA CONTENIDA EN UN SISTEMA ACUÍFERO, YA SEA POR GRAVEDAD, POR BOMBEO O CUALQUIER OTRO SISTEMA DE ELEVACIÓN SE LE CONOCERÁ EN GENERAL COMO UNA CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA; LA MÁS COMÚN ACTUALMENTE ES LA VERTICAL O POZO. OTRO TIPO DE CAPTACIONES QUE REUNEN TAMBIÉN UN INDUDABLE INTERÉS, EN ESPECIAL EN CIRCUNSTANCIAS APROPIADAS, SON LAS GALERÍAS Y LOS DRENES.

LOS ENSAYOS DE BOMBEO, EN SUS MÚLTIPLES VARIANTES, SON LA PRINCIPAL HERRAMIENTA DE QUE SE DISPONE PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE POZOS, PREDICCIÓN DE CAUDALES Y DESCENSOS FUTUROS, Y FUNDAMENTALMENTE PARA ESTA ETAPA DE LA ECUACIÓN DE BALANCE, LA OBTENCIÓN DE VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS, COMO LOS ENSAYOS EN LOS QUE SE OBSERVAN LOS DESCENSOS PRODUCIDOS EN OTROS POZOS O EN PIEZÓMETROS PRÓXIMOS O AÚN EN EL MISMO POZO DE BOMBEO, LAS PRUEBAS PARA ESTUDIAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL POZO AFORANDO EL GASTO QUE SE LE EXTRAE Y LA MEDICIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA, DESPUÉS DE QUE EL BOMBEO HA CESADO PARA VALUAR LA RECUPERACIÓN.

TODOS ESTOS BOMBEO SE REALIZAN EN CONDICIONES CONTROLADAS A FIN DE QUE CONOCIDA LA VARIACIÓN DE UNA MAGNITUD Y SUS EFECTOS, PODER DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO O DEL POZO DE BOMBEO, EN GENERAL SE TRATA DE BOMBEO A GASTO CONSTANTE DURANTE CIERTOS INTERVALOS DE TIEMPO. ES POSIBLE INTERPRETAR CUALQUIER BOMBEO DEL QUE SE CONOZCA LA EVOLUCIÓN DE LOS CAUDALES Y LOS DESCENSOS PRODUCIDOS EN EL ACUÍFERO, PERO RESULTA MUY DIFÍCIL ENCONTRAR MÉTODOS SENCILLOS Y RÁPIDOS DE -

ANÁLISIS QUE NO ENMASCAREN LOS OBJETIVOS BUSCADOS, POR LO QUE SIEMPRE QUE SE PUEDA SE PREFIEREN LOS ENSAYOS A GASTO CONSTANTE.

LOS ENSAYOS DE BOMBEO COMPORTAN UN DESCENSO PROGRESIVO DE NIVELES DEBIDO AL AGRANDAMIENTO DEL CONO DE INFLUENCIA, HASTA QUE LLEGA UN MOMENTO EN EL QUE LA RECARGA IGUALA AL BOMBEO Y ENTONCES SE LLEGA A UN RÉGIMEN PERMANENTE; TEÓRICAMENTE EN ACUÍFEROS CONFINADOS Y EN LIBRES SIN RECARGA EL RÉGIMEN PERMANENTE NO SE ALCANZA NUNCA, PERO PARA POZOS Y PIEZÓMETROS RELATIVAMENTE PRÓXIMOS AL POZO DE BOMBEO EN COMPARACIÓN CON EL RADIO DE INFLUENCIA, SE LLEGA A UN ESTADO CASI ESTACIONARIO EN EL QUE EL RÉGIMEN PUEDE CONSIDERARSE COMO PERMANENTE PARA MUCHOS EFECTOS PRÁCTICOS.

SE PUEDEN CONSIDERAR ENSAYOS DE BOMBEO, EN SENTIDO AMPLIO, DE MUY DIVERSAS CATEGORÍAS, DESDE EL SIMPLE AFORO PARA HALLAR EL CAUDAL DE EXPLOTACIÓN DE UN POZO QUE BASTA CON UN GASTO MÁS O MENOS CONSTANTE, UN DISPOSITIVO SIMPLE DE AFORO Y UNA IDEA DEL DESCENSO PRODUCIDO, HASTA ENSAYOS DE BOMBEO PARA EL ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS ACUÍFEROS QUE NECESITA DE ABUNDANTES PUNTOS DE OBSERVACIÓN, CUIDADOSO CONTROL DEL GASTO, MEDICIONES DE NIVELES CON PRECISIÓN, BIEN PLANEADOS Y DURANTE VARIOS DÍAS. ASÍ MISMO, ES PRECISO SELECCIONAR UN LUGAR QUE REUNA CIERTAS CONDICIONES QUE FACILITEN NO SÓLO LA EJECUCIÓN SINO TAMBIÉN LA INTERPRETACIÓN Y QUE LOS DATOS QUE SE OBTENGAN REPRESENTEN LAS CARACTERÍSTICAS MEDIAS BUSCADAS CON LA MEJOR GARANTÍA POSIBLE.

CONVIENE QUE EL LUGAR ELEGIDO, DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOHIDROLOGÍA, PRESENTE CONDICIONES COMO:

- 1.- EN ESE LUGAR EL ACUÍFERO SEA LO MÁS HOMOGÉNEO POSIBLE.
- 2.- EL ACUÍFERO RESPONDA A UN MODELO SENCILLO, POR EJEMPLO SI ES CONFINADO QUE SEA DE ESPESOR CONSTANTE, SI ES LIBRE QUE SU BASE SEA HORIZONTAL, SI ES SEMICONFINADO, -

QUE EL ESPESOR SEA CONSTANTE, SI ES HORIZONTAL, QUE LA ZONA DE AEREAÇÃO ESTE BIEN DEFINIDA, ETCETERA.

- 3.- NO EXISTAN BARRERAS PRÓXIMAS O QUE POR LO MENOS ESTEN - BIEN DEFINIDAS, QUE NO SE PRESENTEN CAMBIOS LATERALES - DE PERMEABILIDAD Y/O ESPESOR IMPORTANTES,
- 4.- EL FLUJO NATURAL SEA INEXISTENTE O CON UN GRADIENTE PEQUEÑO Y CONOCIDO, O POR LO MENOS MUCHO MENOR QUE EL CREADO POR EL BOMBEO EN EL ÁREA DE OBSERVACIÓN.
- 5.- SE CONOZCA BIEN LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA DEL SUBSUELO.
- 6.- NO EXISTAN BOMBEO PRÓXIMOS U OTRAS ACTIVIDADES QUE PROVOQUEN VARIACIONES GRANDES EN EL NIVEL DE AGUA.
- 7.- SI EL ACUÍFERO ES LIBRE, QUE EL NIVEL FREÁTICO ESTE LO SUFICIENTEMENTE PROFUNDO COMO PARA NO TENER QUE CONSIDERAR EFECTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN NI RECARGAS RÁPIDAS - POR PEQUEÑAS LLUVIAS.
- 8.- EL AGUA BOMBEADA NO VUELVA AL ACUÍFERO.

EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO Y EL DE OPERACIÓN SON FACTORES A LOS QUE TAMBIÉN HABRÁ QUE DAR LA DEBIDA IMPORTANCIA, AUNQUE MUY RARA VEZ SE CUMPLEN TODAS LAS CIRCUNSTANCIAS PORQUE EN REALIDAD, LA SELECCIÓN VIENE INFLUENCIADA POR MUCHOS FACTORES, TANTOS QUE, EN OCASIONES PUEDE RESULTAR VENTAJOSA UNA OBSERVACIÓN DEFICIENTE SI CONCURREN CIRCUNSTANCIAS ECONÓMICAS - FAVORABLES.

NO DEBE OLVIDARSE EL CONTROL DEL CAUDAL DE -- BOMBEO, ES PRECISO MEDIRLO CON FRECUENCIA, P. EJ. CADA MEDIA - HORA EFECTUANDO LAS CORRECCIONES QUE SEAN NECESARIAS PARA MAN-

TENERLO CONSTANTE.

EL BUEN CONOCIMIENTO DEL CAUDAL BOMBEADO Y EL MANTENERLO CONSTANTE ES TAN IMPORTANTE COMO LA PRECISIÓN EN LA MEDIDA DE LOS NIVELES DE AGUA, Y ES LAMENTABLE QUE MUCHAS VECES NO SE LE DÉ LA DEBIDA IMPORTANCIA. EL AJUSTE DEL GASTO A UN VALOR CONSTANTE EXIGE QUE SE DISPONGA DE UNA VÁLVULA DE REGULACIÓN SENSIBLE Y DE FRECUENTES REAJUSTES. NO CONVIENE REGULAR EL CAUDAL CON EL MOTOR DE LA BOMBA.

FINALMENTE, PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÚLTIMO TÉRMINO DE LA ECUACIÓN DE BALANCE, EL INCREMENTO DE ALMACENAMIENTO; SERÁ NECESARIO CONOCER LAS OSCILACIONES DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO EN EL ACUÍFERO, DEBIDAS PRINCIPALMENTE A LA EXTRACCIÓN POR BOMBEO O A LA RECARGA POR LA PRECIPITACIÓN, Y ALGUNAS VECES A CAUSAS TALES COMO LA SUCESIÓN DE ÉPOCAS SECAS Y ÉPOCAS HÚMEDAS Y A LAS VARIACIONES DE NIVELES EN RÍOS Y LAGOS CONECTADOS DIRECTAMENTE CON EL ACUÍFERO. TODO ÉSTO SUPONE UN CAMBIO EN EL ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO.

LA ÚNICA FORMA DISPONIBLE PARA MEDIR LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN UN ACUÍFERO ES MEDIANTE UNA PERFORACIÓN QUE PERMITA UN ACCESO DIRECTO AL MISMO. ÉSTAS SON: LOS POZOS EXISTENTES EN LA ZONA, EXCAVACIONES HASTA EL NIVEL DEL AGUA Y LOS PIEZÓMETROS QUE SON A MODO DE POZOS, EN GENERAL DE PEQUEÑO DIÁMETRO, CONSTRUIDOS ESPECIALMENTE CON ESE OBJETIVO; ES COSTOSA Y DEBE REDUCIRSE AL MÍNIMO INDISPENSABLE. DEBE TRATARSE DE APROVECHAR LOS ACCESOS AL ACUÍFERO QUE YA EXISTAN Y SEAN SUFICIENTEMENTE REPRESENTATIVOS TALES COMO POZOS, GALERÍAS, ZONAS PANTANOSAS, RÍOS CONECTADOS CON EL ACUÍFERO, ETCÉTERA.

EN POZOS Y PIEZÓMETROS EL NIVEL DEL AGUA SE MIDE EN GENERAL CON UNA CINTA METÁLICA Y UN DISPOSITIVO O ARTIFICIO PARA DELATAR EL NIVEL DEL AGUA. TRABAJANDO CORRECTAMENTE SE

PUEDE TRABAJAR CON LA PRECISIÓN DEL MILÍMETRO; PARA MAYORES PRECISIONES SON NECESARIOS DISPOSITIVOS MÁS DELICADOS, EN GENERAL BASTA MEDIR CON LA PRECISIÓN DEL CENTÍMETRO Y EN OCASIONES BASTA CON ERRORES DE 10cm, SI EL GRADIENTE PIEZOMÉTRICO ES ELEVADO; SI ÉSTE ES MUY PEQUEÑO SE REQUERIRÁ MEDIR CON MAYOR PRECISIÓN; HABRÁ QUE TENER UN PUNTO DE REFERENCIA PARA CONOCER LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO, POR LO QUE ES PRECISO CONOCER LA COTA DE LA REFERENCIA RESPECTO A UN CIERTO PUNTO FIJO TAL COMO EL NIVEL DEL MAR, UNA SEÑAL DETERMINADA, ETC., LO QUE SUPONE UNA NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE LAS DISTINTAS REFERENCIAS, DEBIENDO TENER POR LO MENOS LA PRECISIÓN CON QUE SE DESEAN CONOCER LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS.

LA CUANTIFICACIÓN DEL INCREMENTO DE VOLUMEN CONSISTE EN COMPARAR LA ENTRADA O SALIDA NETA DE AGUA EN UNA PORCIÓN DE ACUÍFERO CONOCIDA, CON EL CAMBIO DE NIVEL PRODUCIDO; -- LOS VALORES OBTENIDOS SON UN PROMEDIO EN TODA EL ÁREA Y LOS MAPAS DE VARIACIÓN DE NIVEL FREÁTICO AYUDAN AL ESTUDIO DE ÁREAS EXTENSAS. (FIGURA 17),

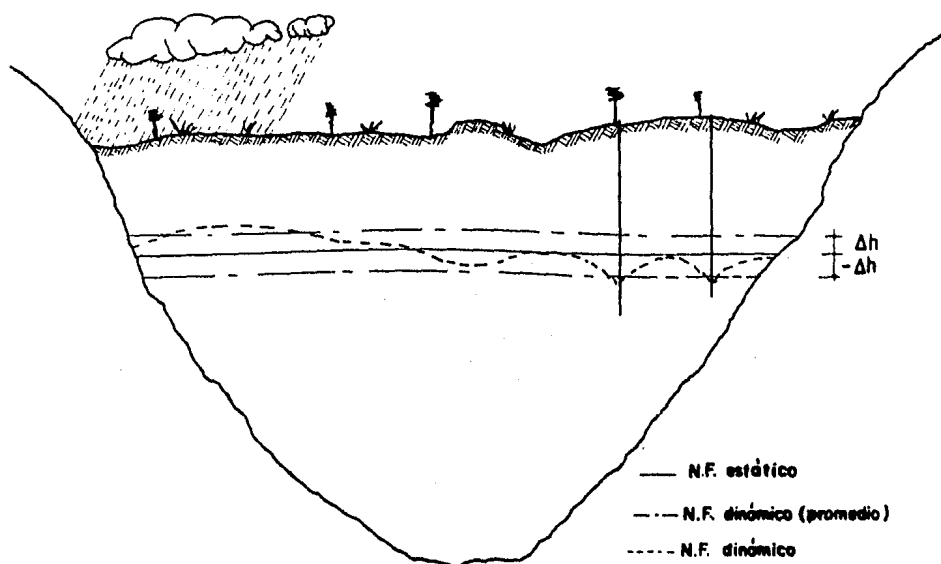


FIG. 17.-

EL VOLUMEN DEL INCREMENTO DE MATERIAL SATURADO

Ó SECO EN SU CASO SERÁ; ATENDIENDO A LA FIGURA 13:

$$\Delta V_{m_s} = A \times \Delta h$$

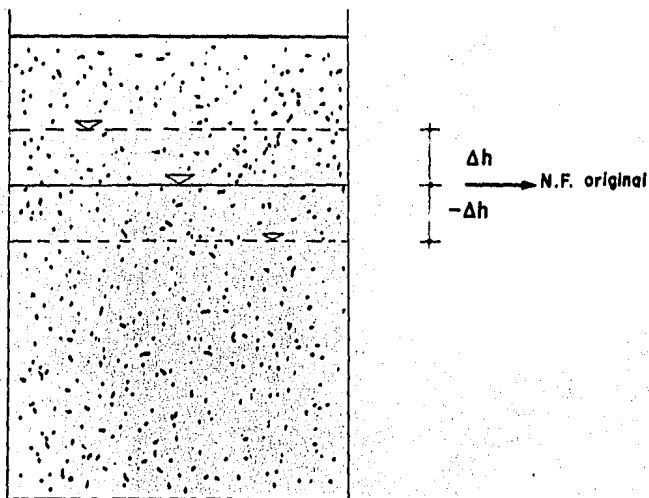


FIG. 18.-

POR LO QUE EL INCREMENTO (Ó DECREMENTO) DE ALMACENAMIENTO QUEDARÁ:

$$\Delta V = A \times \Delta h \times S$$

SIENDO:

- A = ÁREA DE LA EXTENSIÓN EN ESTUDIO.
- S = COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.
- Δh = PROMEDIO DE LA DIFERENCIA DE ALTURAS DEL NIVEL FREÁTICO MEDIDAS EN CIERTO INTERVALO DE TIEMPO - PUEDE SER MUY LARGO - DEPENDIENDO DE LAS VARIACIONES DEL NIVEL.

DESPUÉS DEL ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DE LA ECUACIÓN DEL BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, SIN QUE SE PRETENDA HABER LLEGADO A LA DEFINICIÓN PERFECTA, DADA LA COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA Y A LA DIVERSIDAD DE CRITERIOS - SOBRE TODO EMPÍRICOS - PARA DETERMINARLAS. A MANERA DE CONCLUSIÓN, EN EL SIGUIENTE CAPÍTULO SE PLANTEARÁ Y RESOLVERÁ UN PROBLEMA, A FIN DE LOGRAR UNA MEJOR COMPRESIÓN DE LOS CONCEPTOS TRATADOS EN ESTE TRABAJO. ADEMÁS SE EMITEN ALGUNOS COMENTARIOS MUY BREVES QUE SE CONSIDERAN IMPORTANTES PARA UN MEJOR APROVECHAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

EN EL PRESENTE CAPÍTULO SE PLANTEA UN EJEMPLO QUE ANTE TODO PRETENDE SER ILUSTRATIVO EN LA APLICACIÓN DE LOS CONCEPTOS, Y QUE SIN LLEGAR A SER REAL, LOS DATOS OBTENIDOS PARA DICHO EJEMPLO SON LOS MÁS CERCANOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO A LA QUE SE REFIERE.

EJEMPLO.- CALCULAR LA RECARGA PRODUCIDA EN UN ACUÍFERO QUE ESTA LIMITADO EN UN LADO POR LA SIERRA Y EN EL OTRO POR EL MAR, SIENDO SU EXTENSIÓN LATERAL MUY AMPLIA A LO LARGO DE TODA LA COSTA, POR LO QUE PUEDE TOMARSE UNA SECCIÓN DE 1 km DE ANCHO PARA EFECTOS DE SIMPLIFICACIÓN Y QUE SEA LA MÁS REPRESENTATIVA. LA DISTANCIA ENTRE LA SIERRA Y EL MAR ES DE 10 km; EL 50% DE LA SUPERFICIE ES OCUPADA PARA SEMBRAR CINCO CULTIVOS, LA OTRA PORCIÓN CUENTA CON UN LAGO DE 1,9 km², ÁREA VERDE (PASTOS) Y UN MANANTIAL QUE PERTENECE AL GRUPO CUATRO CON 26 l / s , UTILIZADO PARA ABASTECER A LA POBLACIÓN CERCANA.

VARIOS ENSAYOS DE BOMBEO REALIZADOS HACEN PRESUPONER QUE SE CUENTA CON UN COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO DE 0,162 Y QUE EL DESCENSO DE NIVELES MEDIDOS AL PRINCIPIO Y AL FINAL DE LA COSECHA ES DE 4,2m EN LA PARTE DONDE SE HICIERON LOS CULTIVOS SOLAMENTE, NO SE RECIBIERON PRECIPITACIONES EN LA ZONA EN ESTUDIO (SE TRATA DE UN AÑO SECO), EL CLIMA ES HÚMEDO Y SE EMPIEZA A SEMBRAR EL PRIMERO DE NOVIEMBRE, SÓLO UNA VEZ CADA COSECHA, LOS DATOS SE MUESTRAN A CONTINUACIÓN,

SE CUENTA CON 500 Hg PARA EL CULTIVO, QUE SE REGARÁN CON EL AGUA PRODUCTO DEL BOMBEO. LA ZONA EN ESTUDIO TIENE UNA LATITUD DE 20° 30' N, CORRESPONDIENDO A CADA CULTIVO LAS SIGUIENTES ÁREAS, PERÍODO VEGETATIVO Y COEFICIENTE GLOBAL DE USO CONSUNTIVO (OBTENIDOS DE TABLAS; SE TOMARON LOS VALORES BAJOS POR TRATARSE DE UNA ZONA HÚMEDA).

TABLA 1

CULTIVO	AREA (Ha)	PERIODO VEGETATIVO (MESES)	K
MAIZ	120	4 A 7	0.75
ARROZ	120	3 A 5	1.00
JITOMATE	100	4	0.70
CAÑA DE AZUCAR	80	AÑO COMPLETO	0.75
ALGODÓN	80	6 A 7	0.60

TABLA 2

MES	TEMPERATURA MEDIA (t) EN °C	PORCENTAJE DE HORAS-LUZ (p)	HUMADAD RELATIVA (%)
NOVIEMBRE	23,7	7,56	50
DICIEMBRE	20,7	7,63	44
ENERO	19,2	7,72	53
FEBRERO	19,5	7,25	44
MARZO	20,0	8,40	39
ABRIL	22,5	8,54	37
MAYO	24,2	9,17	39
JUNIO	26,6	9,03	53
JULIO	28,2	9,27	60
AGOSTO	28,1	8,97	62
SEPTIEMBRE	27,8	8,29	60
OCTUBRE	26,2	8,16	53

SOLUCIÓN:

PROCEDIENDO A DETERMINAR PRIMERAMENTE EL USO -
 CONSUNTIVO (U.C.) POR MEDIO DE LA FÓRMULA DE BLANEY Y CRIDDLE -
 PARA ZONAS HUMEDAS, SE OBTENDRÁ EL ESPESOR DE LA LÁMINA DE AGUA
 PARA EXTRAER DEL ACUÍFERO EN UN AÑO,

$$U.C. = Kg \sum_{i=1}^n p(a)$$

$$a = \frac{t_i + 17.8}{21.8}$$

t_i = TEMPERATURA MEDIA DIARIA DE CADA MES, POR LO QUE:

MES	a	p(a)
NOVIEMBRE	1.90	14.39
DICIEMBRE	1.77	13.48
ENERO	1.70	13.10
FEBRERO	1.71	12.40
MARZO	1.73	14.57
ABRIL	1.85	15.79
MAYO	1.93	17.67
JUNIO	2.04	18.39
JULIO	2.11	19.56
AGOSTO	2.11	18.89
SEPTIEMBRE	2.09	17.34
OCTUBRE	2.02	16.47

ATENDIENDO AL PERÍODO VEGETATIVO Y COEFICIENTE GLOBAL DE CADA CULTIVO:

CULTIVO	$\Sigma p_i \cdot (a)$	U.C. (cm)
MAIZ	53,37	40,03
ARROZ	40,97	40,97
JITOMATE	53,37	37,36
CAÑA DE AZUCAR	192,05	144,04
ALGODON	83,73	50,24

EL USO CONSUNTIVO APLICADO A CADA ÁREA DE CULTIVO DEFINIRÁ EL VOLUMEN A EXTRAER EN EL PERÍODO VEGETATIVO DE CADA SIEMBRA, ASÍ:

$$V \text{ MAÍZ} = (120 \text{ Ha}) \frac{10\,000 \text{ m}^2}{1 \text{ Ha}} (40,03 \text{ cm}) \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$$

$$= 480,360 \text{ m}^3$$

$$V \text{ ARROZ} = (120 \text{ Ha}) \frac{10\,000 \text{ m}^2}{1 \text{ Ha}} (40,97 \text{ cm}) \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$$

$$= 491,640 \text{ m}^3$$

$$V \text{ JITOMATE} = (100 \text{ Ha}) \frac{10\,000 \text{ m}^2}{1 \text{ Ha}} (0,3736 \text{ m})$$

$$= 373,600 \text{ m}^3$$

$$V \text{ CAÑA} = (80 \times 10^4 \text{ m}^2) (1,4404 \text{ m})$$

$$= 1\,152,320 \text{ m}^3$$

$$V \text{ ALGODÓN} = (80 \times 10^4 \text{ m}^2) (0,5024 \text{ m})$$

$$= 401,920 \text{ m}^3$$

DE AQUÍ, EL VOLUMEN TOTAL ES LA SUMA DE LOS VOLUMENES UTILIZADOS POR CADA CULTIVO Y QUE SE EXTRAJO DE LOS POCOS DE BOMBEO; LUEGO ENTONCES:

$$V \text{ TOTAL} = 2'899,840 \text{ m}^3$$

EN LA PORCIÓN CUBIERTA DE PASTOS, SE CONSIDERA A UNA DÉCIMA PARTE DEL U.C., CON LA INTELIGENCIA DE QUE NO SE REGARÁ, SINO QUE EL FOLLAJE EXTRAERÁ EL AGUA DEL ACUÍFERO PRODUciendo SU EVAPOTRANSPIRACIÓN:

$$\begin{aligned} \text{U.C.} &= K_g \sum_{i=1}^{12} P_i (\alpha) \quad ; \quad K_g = 0.75 \\ &= 0.75 (192.05) \frac{1}{10} \end{aligned}$$

$$\text{U.C.} = 14.40 \text{ cm}$$

$$V \text{ PASTOS} = (310 \times 10^4 \text{ m}^2) (0.144 \text{ m})$$

POR LO TANTO:

$$V \text{ PASTOS} = 446,516 \text{ m}^3$$

CALCULANDO LA EVAPORACIÓN PRODUCIDA EN EL LAGO, APLICANDO LA FÓRMULA DE LUNGEON, PARA CADA MES Y UTILIZANDO LOS DATOS PROPORCIONADOS EN LA TABLA # 2, SE TIENE:

$$E = 0.398 \cdot d (e_s - e_a) \cdot \left[\frac{273 + t}{273} \right] \cdot \left[\frac{760}{P_a - e_s} \right]$$

MES	t EN °C	HUMEDAD RELATIVA (%)	e _a	e _s	E _m (mm)
NOV.	23,7	50	14	24	134
DIC.	20,7	44	9	20	145,12
ENE.	19,2	53	9,5	17,5	104,65
FEB.	19,5	44	8	18	122,30
MAR.	20,0	39	8	19	144,58
ABR.	22,5	37	8,5	22	179,68
MAY.	24,2	39	10,5	24	181,20
JUN.	26,6	53	15,5	27	156,24
JUL.	28,2	60	18,5	30	157,72
AGO.	28,1	62	19	30	150,81
SEPT.	27,8	60	18	29	150,46
OCT.	26,2	53	15	26,5	155,92

OBTENIÉNDOSE UNA EVAPORACIÓN EN ESE AÑO DE -- 1782,68 mm, QUE AFECTADOS EN EL ÁREA DEL LAGO DE 190 Ha, CON SUMIERON UN VOLUMEN IGUAL A 3'385,800 METROS CÚBICOS.

EL VOLUMEN DE AGUA EVAPORADO EN EL LAGO Y EN LA ZONA DE PASTIZALES SERÁ EL REFERIDO AL TÉRMINO "EVAPOTRANSPIRACIÓN" EN LA ECUACION DE BALANCE; POR LO QUE:

$$\begin{aligned}
 E_{vt} &= E_{\text{lago}} + E_{vt \text{ pastos}} \\
 &= 3'385,800 + 446,516
 \end{aligned}$$

$$E_{vt} = 3'832,316 \text{ m}^3$$

LA EXTRACCIÓN QUE HIZO EL MANANTIAL ES:

$$V \text{ MANANTIAL} = 26 \text{ l/s} \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right) \left(\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ DIA}} \right) \left(\frac{360 \text{ DÍAS}}{1 \text{ Año}} \right)$$

$$V \text{ MANANTIAL} = 808,704 \text{ m}^3$$

LA ZONA OCUPADA POR LOS CULTIVOS, TUVO UN DECREMENTO DE ALMACENAMIENTO; ASÍ QUE:

$$\Delta V = 500 \times 10^4 \text{ m}^2 (4,2 \text{ m}) (0,162)$$

$$\Delta V = 3'402,000 \text{ m}^3$$

APLICANDO LA ECUACIÓN DE BALANCE:

$$R = M + E_{vt} + D_b + S_h + B - \Delta V$$

QUE POR TRATARSE DE UN AÑO SIN PRECIPITACIÓN Y NO DEFINIR LA EXISTENCIA DE RÍOS, EL GASTO BASE ES NULO Y EL -- FLUJO SUBTERRÁNEO ES INSIGNIFICANTE, QUEDANDO:

$$R = M + E_{vt} + B - \Delta V$$

$$= 808\ 704 + 3'832\ 316 + 2'899\ 840 - 3'402\ 000$$

$$R = 4'138\ 860 \text{ m}^3/\text{km DE ANCHO}$$

QUE ES EL VOLUMEN DE AGUA CAPTADO POR EL ACUÍFERO EN UN AÑO AL SUFRIR LAS EROGACIONES CALCULADAS.

ES PRECISO DECIR QUE CUALQUIERA DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS, TIENE INDETERMINACIONES QUE SÓLO EL BUEN CONOCIMIENTO DE LA CUENCA Y LA EXPERIENCIA DEL HIDRÓLOGO PUEDAN SUPLIR, Y EN MUCHOS CASOS LA COMPROBACIÓN POR VARIOS MÉTODOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ES LA ÚNICA FORMA DE OBTENER LOS CRITERIOS QUE MÁS SE APROXIMEN A LA REALIDAD.

OBRAS CONSULTADAS.

CASTANY, G. PROSPECCION Y EXPLOTACION DE LAS AGUAS SUB-TERRANEAS. EDICIONES OMEGA, S.A, ESPAÑA, 1975.

CASTANY, G. TRATADO PRACTICO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS. EDICIONES OMEGA, S. A. ESPAÑA, 1971.

CUSTODIO, EMILIO / LLAMAS MANUEL R. HIDROLOGIA SUB---TERRANEA, (DOS TOMOS), EDICIONES OMEGA, S.A. ESPAÑA, 1976.

LINSLEY, KOHLER, PAULUS. HIDROLOGIA PARA INGENIEROS. Mc GRAW-HILL. MÉXICO, 1980.

LONGWEL Y FLINT, GEOLOGIA FISICA. EDITORIAL LIMUSA. MÉXICO, 1981.

MURGUIA V., ERNESTO. CONTAMINACION DE AGUAS. FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM, 1982.

PUIG DE LA PARRA, JUAN. APUNTES DE GEOLOGIA APLICADA.

SPRINGAL, ROLANDO. HIDROLOGIA. INSTITUTO DE INGENIERÍA. UNAM, 1970.