

MEDIDA Y CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN

POR PEDRO M. GONZÁLEZ QUIJANO, INGENIERO DE CAMINOS

El autor hace consideraciones de la mayor importancia acerca del fenómeno de la evaporación aplicada a los grandes embalses, demostrando la necesidad de multiplicar el número de observaciones que deben ser recogidas y manejadas con profundo conocimiento del tema, si no se quiere incurrir en los más graves errores, que señala y comenta con su gran autoridad en la materia.

En la economía del agua, es la evaporación factor importantísimo. De la cantidad total de lluvia que reciben los continentes, sólo una parte relativamente pequeña vierten los ríos en el mar; el resto, casi en su totalidad, se evapora, y es del mayor interés, sobre todo en los países áridos, reducir en cuanto sea posible esta pérdida, y por lo menos, tenerla en cuenta en la redacción de los proyectos y en la administración y empleo de las aguas que cabe utilizar.

Otras veces es, por el contrario, la evaporación un fenómeno útil, como ocurre, por ejemplo, en las grandes centrales térmicas, donde la necesidad de disipar las cantidades considerables de calor que llegan a los condensadores, obliga a recurrir a este medio, si no se dispone de enormes provisiones de agua, que pueden faltar en condiciones apropiadas hasta en los países húmedos.

Muchos de los grandes empleos del agua conducen también, en definitiva, a su evaporación: los riegos agrícolas no tienen otro objeto que suministrar a la planta el agua que ha de evaporar por sus hojas, y el consumo que de ella hacen hombres y animales es reintegrado en gran parte a la atmósfera por respiración y transpiración.

Deslindar estos dos dominios, el de la evaporación útil y el de la evaporación perjudicial, es, pues, asunto del mayor interés, porque de él dependen las normas que hubieran de aplicarse para restringir, en lo posible, la segunda en beneficio de la primera; pero el tema es demasiado extenso para ser tratado en un artículo, por lo que hemos de reducir el presente a algunas consideraciones sobre el cálculo y la medida de la evaporación.

Desgraciadamente, los datos precisos y suficientemente generales que sobre esta materia se poseen, son bastante escasos, aunque sean numerosos los obtenidos en un sinnúmero de casos particulares; pero con resultados tan divergentes, que se hace difícil elegir, cuando no se conocen suficientemente las condiciones en que han sido recogidos.

Durante mucho tiempo se han limitado estos datos a los suministrados por los evaporímetros de los observatorios meteorológicos, consistentes en pequeños vasos expuestos al aire o en superficies reducidas, que se mantenían constantemente húmedas, deduciéndose en uno y otro caso la evaporación de la cantidad de agua consumida. Se asimilaba de este modo la medida de la evaporación o la de la presión, de la temperatura o de la lluvia, y todo el cuidado se dirigía a determinar el aparato y las condiciones de instala-

ción y observación más convenientes, como se hacía para el barómetro, el termómetro o el pluviómetro.

Se comprobó, sin embargo, que las diferentes superficies evaporatorias, aun colocadas en igualdad de condiciones, no consumían igual cantidad de agua, y se imaginaron nuevos aparatos para medir la evaporación de la tierra, ya desnuda o ya cultivada, y se hacían comparaciones y se deducían coeficientes no siempre concordantes.

Y no podía ser de otra manera, porque el fenómeno que se trataba de medir no era, en realidad, asimilable ni a la presión, ni a la temperatura, ni a la lluvia. Depende la presión de los movimientos de las grandes masas de aire, que también influyen sobre la temperatura, la cual viene, además, determinada por la radiación solar; la lluvia, a su vez, se forma en la atmósfera a una cierta altura; en todos estos fenómenos, el suelo no interviene sino de una manera pasiva, y aunque sobre algunos de ellos pueda tener alguna limitada influencia, no puede modificar gran cosa su intensidad, que puede ser, aproximadamente, la misma en una cierta zona alrededor del punto de observación.

Pero la evaporación tiene lugar sobre el suelo mismo, donde el agua no se reparte con uniformidad, y al producirse en grandes proporciones, altera la temperatura del suelo y la humedad de las capas de aire en contacto con él, con lo cual el fenómeno tiende a modificarse a sí mismo. No es posible aquí una regularidad análoga a la de los otros casos, y la medida obtenida en un punto carece del valor que en aquellos otros pueda tener. Por eso pudo decir ya Angot: "Cada masa de agua tiene, por decirlo así, su evaporación propia, y eso quita toda generalidad a los resultados".

Para darse cuenta de la dificultad del problema, y para poderse orientar en la elección y aplicación de los datos conocidos, es preciso examinar en detalle el mecanismo de la evaporación, el cual nos permitirá, a su vez, apreciar las deficiencias actuales y marcar los rumbos que debieran seguir las investigaciones futuras.

En su aspecto cualitativo, las leyes de la evaporación son bien conocidas: para una temperatura dada, el líquido emitirá vapores mientras la tensión de los mismos no alcance en las proximidades de la superficie un cierto valor límite; por otra parte, la evaporación es un trabajo y consume, por consiguiente, una cierta cantidad de energía. Experimentos físicos suficientemente precisos, han permitido determinar para

las distintas temperaturas la tensión límite y el consumo de energía por unidad de peso del agua evaporada. Tablas especiales nos dan a conocer esos valores; pero todavía, para que podamos conocer la intensidad de la evaporación, será preciso disponer de una fórmula que ligue esos valores con las condiciones de ambiente en que el fenómeno se realiza. Esta fórmula fué enunciada por Dalton, y tiene por expresión:

$$E = \frac{CS(F - f)}{P}$$

en la que E , representa la cantidad evaporada en la unidad de tiempo; S , la superficie de agua expuesta a la evaporación; F , la tensión máxima correspondiente a la temperatura del agua; f , la tensión efectiva del vapor en el aire; P , la presión atmosférica, y C , un coeficiente que se supone constante.

Ya sobre la constancia de ese coeficiente se presentaron algunas dudas, y el propio Dalton hubo de reconocer que aumentaba con la intensidad del viento; pero aun suponiéndole un valor invariable, la aplicación de la fórmula exigiría que los demás elementos que en ella intervienen permanecieran los mismos durante el período de observación. Ahora bien: S y P no varían, por lo general, gran cosa; pero puede no ocurrir lo mismo con F y f . Por una parte, la producción de vapores tiende a aumentar la humedad del aire, y, por consiguiente, f ; de otra, el consumo de energía que la evaporación requiere tenderá a disminuir la temperatura del agua y, por consiguiente, F . Por una y otra causa, la diferencia $F - f$ vendría a disminuir y el fenómeno acabaría por anularse a sí mismo.

Para que así no ocurra y pueda, al fin, establecerse un régimen, será preciso que los vapores sean alejados de la superficie líquida, y que las pérdidas de energía sean suficientemente reparadas. Para lo primero, tres mecanismos diferentes pueden ponerse en juego: la simple *difusión*, mediante la cual, sin movimientos de masa aparentes, las moléculas de vapor se mezclarían con las del aire, repartiéndose así en la atmósfera; la *convección*, en la que a este efecto vendría a añadirse la diferencia de temperatura y la menor densidad del aire húmedo que le haría desprenderse de la superficie evaporante, llevando consigo los vapores producidos; el *arrastre*, por las corrientes de aire que rozan con el líquido.

El primer fenómeno, sin embargo, es tan extraordinariamente lento, que apenas si habría que contar con él en la práctica; tomándolo en cuenta, como fenómeno principal, llegó Stefan a la conclusión de que la evaporación no sería proporcional a la superficie, sino a sus dimensiones lineales, lo que estaría en contradicción no sólo con la ley de Dalton, sino también con la experiencia. Algo más eficaz es el segundo, aunque todavía insuficiente para dar razón de los fenómenos observados, y es al tercero al que principalmente habrá que dar importancia, si nos colocamos en

el orden de las magnitudes que interesan al ingeniero.

Un sencillo experimento basta para percatarse de esta gradación: si tomamos dos tubos de ensayo, de los empleados en los laboratorios de Química, llenamos el uno completamente de agua y el otro solamente hasta uno o dos centímetros del borde, y los exponemos al aire en un ardoroso día de verano, aunque coloquemos el uno al lado del otro, podremos observar que mientras en el primero baja el nivel 5 ó 6 mm., en el segundo sólo desciende 1 ó 2, y si se mantienen en condiciones análogas de exposición y de temperatura, se vería que el descenso de nivel es cada vez más lento a medida que éste se aleja de la boca del tubo, de suerte que, en vez de ser proporcional al tiempo de exposición, vendría a serlo aproximadamente a la raíz cuadrada del mismo, o aún menos.

La explicación es fácil: a medida que baja el nivel, las paredes del tubo defienden cada vez mejor la superficie líquida de los movimientos del aire y contribuyen también a que sea más largo el espacio recorrido por la corriente de convección para derramarse en la atmósfera. Pero todavía esa corriente puede subsistir; si se varía ligeramente la experiencia, substituyendo el tubo de ensayo por un tubo encorvado, cerrado por uno de sus extremos y abierto por el otro hacia abajo, el consumo del agua por evaporación es todavía más lento porque entonces la menor densidad del vapor le impide escapar, como no sea por difusión. Así, mientras los evaporímetros del Observatorio acusan en Madrid pérdidas de 1 m. 60, y aún más, en el Laboratorio de la Escuela de Caminos he podido conservar durante tres años una pequeña columna de agua en uno de estos tubos encorvados, sin más pérdida en total que unos 3 ó 4 cm.

Aún podría caber alguna duda al observar evaporaciones de importancia con aire al parecer en calma; pero hay que tener en cuenta que una calma absoluta rara vez existe, que una velocidad de 0,5 m. por segundo, completamente insensible a menos de observaciones delicadas, supone un recorrido diario de 43 km. y que, hasta sin velocidad horizontal bien marcada, pueden producirse en el aire movimientos lentos debidos a desequilibrios caloríficos que permiten una renovación bastante importante.

En cuanto a los consumos de energía que acompañan a la evaporación, sólo pueden ser suplidos cuando no se acude a medios artificiales, con aportes equivalentes de calor procedentes de la radiación solar directa, de la radiación difusa de la atmósfera o de la radiación refleja de los cuerpos próximos. Todas ellas, en definitiva, de la radiación solar dependen, aunque pueda ser ésta más o menos modificada por la forma y naturaleza de los cuerpos reflejantes y por los movimientos del aire.

Con estos antecedentes, fácilmente se comprende cuánto ha de diferir la evaporación de una pequeña superficie de la de las grandes masas de agua sobre las que tiene que actuar el ingeniero. En aquélla, la renovación del aire se obtiene suficientemente con una

relativa facilidad, y las cantidades de calor necesarias pueden ser suplidas por los cuerpos próximos; f no se apartará mucho de la tensión del vapor en el aire, tal como se deduce de las observaciones del psicrómetro, y F tampoco será muy diferente de la tensión máxima que corresponde a la temperatura ambiente. Ambos datos son recogidos en las estaciones meteorológicas completas, y, con ellos a la vista, se llega a una concordancia bastante satisfactoria con las evaporaciones en las mismas estaciones observadas, como comprobaba el Sr. Domingo y Quílez en su folleto *Evaporación meteorológica. Nueva fórmula para su cálculo*, publicado en mayo de 1931 por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Pero cuando se trata de determinar la evaporación de los grandes embalses, el problema se presenta completamente distinto. Mientras que allí el fenómeno local no modifica sensiblemente el ambiente, aquí llega a ser factor importante del mismo, pues el aire ha de estar sensiblemente más húmedo sobre el embalse que en sus alrededores inmediatos. Por otra parte, la radiación total puede no ser bastante a compensar todas las pérdidas, de donde pueden resultar diferencias bastante importantes entre la temperatura del agua y la del aire. La primera no depende tampoco sólo de las condiciones exteriores, sino que dada la gran capacidad calorífica del agua, la del embalse puede almacenar cantidades considerables de calor que, tanto al ser absorbido como al ser gastado, puede producir considerable retraso en los cambios de las condiciones térmicas.

La acción del viento es también muy distinta en uno y otro caso; en el primero, sólo se hará sentir por la renovación general del aire, sobre todo si el evaporímetro se encuentra al abrigo de los vientos fuertes, y podrá, a veces, ser más importante la dirección del viento que su intensidad, por lo que aquélla pueda influir en la humedad del aire. Sobre el embalse, la acción puede ser más variada, pues aparte de la que en general ejerza sobre el aire, como al avanzar éste se va también cargando de humedad, los excesos de evaporación que en una parte produzcan pueden ser compensados con disminuciones más adelante, fenómenos en los que puede tener también notable influencia la turbulencia del aire, no siempre la misma para la misma velocidad. Tampoco la dirección será indiferente, pues los efectos no serán los mismos si el viento sopla en el sentido de la longitud o transversal al embalse.

Como consecuencia de causas tan encontradas, la evaporación en los pantanos puede ser, en ocasiones, superior a la del evaporímetro, aunque, por lo general, sea mucho más reducida. Este hecho había sido ya observado hace bastante tiempo. Aun tratándose de depósitos de sólo 9 m.² de superficie, encontró Salles en Arlés que la evaporación en los mismos era sólo la mitad de la que daban los evaporímetros, y hasta la tercera parte pudo observar Delaporte en Borgaña, con depósitos de 6 m.². Son tal vez valores un poco excepcionales y bastante diferentes entre sí

para que puedan servir de base a ningún cálculo preciso.

Recientemente se han hecho algunos estudios más detallados. En el número de 22 de febrero de 1936, de *Le Génie Civil*, publicaba Leclerc du Sablon, Ingeniero Jefe en la Dirección de los Ferrocarriles del P. O. Midi, los resultados obtenidos en el pantano de Artouste, situado a 1 986 m. de altitud, en los Bajos Pirineos, a unos 20 km. del pueblo de Laruns, y cuyo objeto era alimentar una central destinada a suministrar energía al ferrocarril electrificado. La presencia continua, durante la construcción, de personal técnico de Ingenieros y Ayudantes, permitía asociarlos a la observación sistemática de los fenómenos meteorológicos y físicos, en los cuatro años que duró la ejecución de las obras, de 1926 a 1929.

Por lo que a la evaporación se refiere, las observaciones se hacían en pequeños depósitos de unos 10 litros de cabida, flotantes, los unos, en el lago, y situados los otros en la orilla, a poca distancia de los primeros. Dentro de cada año, el período de observación se extendía de junio a octubre, y el autor resume los resultados en el siguiente cuadro:

		Evaporación media diaria en los meses de					Altura total evaporada del 15 de junio al 31 de Octubre.
		Junio. mm.	Julio. mm.	Agosto. mm.	Sepbre. mm.	Octubre. mm.	
1926	Tierra	»	»	5,99	4,15	1,62	592,44
	Lago	»	»	4,35	2,58	1,06	373,08
1927	Tierra	6,07	5,67	5,74	2,77	3,05	622,41
	Lago	2,83	3,03	3,61	1,70	1,62	349,51
1928	Tierra	»	5,39	7,10	3,77	2,54	647,43
	Lago	»	5,55	3,25	1,55	0,87	319,12
1929	Tierra	3,05	4,77	4,03	2,16	2,33	511,68
	Lago	1,74	2,48	2,56	1,23	1,23	257,37
Media general	Tierra	4,56	5,28	5,71	3,21	2,38	593,00
	Lago	2,29	3,02	3,44	1,76	1,19	324,00

Dada cuenta de su trabajo, es parco en deducir consecuencias, que reduce a las siguientes:

"a) La evaporación ha sido más fuerte en el vaso en tierra que en el otro; la altura evaporada de junio a fin de octubre ha sido, por término medio, de 593 milímetros.

b) La evaporación nocturna es débil, sobre todo en septiembre y octubre.

En total, dadas las condiciones en que se encuentra el lago de Artouste (cuenco abierto al Norte a cerca de 2 000 metros de altitud), la mayor altura evaporada en verano ha sido de 373 mm."

Realmente no se puede deducir más de los datos; pero ellos demuestran que el problema así planteado no permite una solución precisa. Siempre que se trata de comparar la evaporación de los lagos con la que tiene lugar en tierra, parece que se admite implícitamente que existe una relación entre ambos que po-

dría no ser una proporcionalidad estricta, expresable por un coeficiente único, pero que pudiera consistir en una cierta ecuación, mediante la cual se pudiera deducir la una cuando se conociera la otra. Ahora bien: esta relación no existe o, por lo menos, no depende exclusivamente de los valores absolutos de la evaporación. Y las mismas observaciones que acabamos de reseñar lo demuestran.

Si atendemos tan sólo al resultado total, la relación de la evaporación en el embalse a la de los evaporímetros situados en tierra sería de 0,55; pero si hacemos el mismo cálculo para cada uno de los cuatro años, obtenemos números que varían desde 0,49 hasta 0,63, es decir, en un 30 por 100. Todavía es mayor la divergencia si en vez de años completos consideramos aisladamente distintos meses: entonces la relación varía entre 0,34 para octubre de 1928 hasta 0,73 en agosto de 1926, es decir, del simple a más del doble. Sólo una cosa queda cierta: que la una altura es siempre menor que la otra, y esta indicación, en sí misma bastante vaga, era ya conocida de antemano.

De desear hubiera sido que a la observación pura y simple de la evaporación se hubiera añadido la de las temperaturas del agua y del aire y el estado del cielo claro o nublado. Quizás entonces se hubiera podido penetrar más en las causas de esas diferencias y encerrar las relaciones entre límites más estrechos, que permitieran un cálculo más seguro, cuando no sugerir fórmulas, entre elementos de determinación o conocimiento fácil y de influencia efectiva en el fenómeno en estudio.

Un indicio de que así pudiera ser es lo que se observa cuando se comparan las medias generales de cada uno de los distintos meses: las relaciones son entonces las que se indican a continuación:

Junio,	Julio,	Agosto,	Septiembre,	Octubre,
0,50	0,75	0,60	0,55	0,50

Se ve entonces que la relación va así aumentando de junio a agosto para decrecer de agosto a octubre, resultando así en las medias una ley que quedaba oculta entre la variedad de los casos particulares y que parece difícil no referir a la marcha de la temperatura y de la humedad en los meses considerados.

Es interesante también la indicación que se hace sobre la menor evaporación nocturna, lo que naturalmente se debe en parte a la menor temperatura de la noche, pero en parte también a la mayor duración del día durante el período de observación. Es lástima que en el artículo no se consignen a este respecto sino los datos del año 1929, y de esos sólo las medias diarias, en vez de las pérdidas totales del mes, lo que conduce a números pequeños, con los que es difícil calcular sin exponerse a graves errores. Llama la atención, sin embargo, que el efecto sea más marcado en septiembre y octubre, cuando ya la duración del día va disminuyendo y con ella la oscilación diaria de la temperatura; pero hay que tener en cuenta que si la radiación solar es factor importantísimo, no lo es

menos la humedad del aire y la dirección e intensidad del viento, circunstancias estas últimas dependientes en gran parte de las condiciones geográficas y locales.

Por todas estas razones, los resultados obtenidos no son susceptibles de generalización, y por eso muy cuerdamente el autor limita sus conclusiones al caso en que las condiciones sean las mismas que en el embalse de Artouste, sólo que estas condiciones no quedan completamente definidas por la altitud y la orientación.

En la mayor parte de los embalses de España, esos resultados no serían aplicables y el total de nuestras pérdidas por evaporación excederán bastante de los 373 mm. de Artouste, sobre todo en Andalucía y en pantanos situados en altitudes bajas, como el del Guadalquivir, donde el máximo nivel del embalse se halla a unos 60 metros sobre el nivel del mar. El evaporímetro del Observatorio de San Fernando acusa, en efecto, una evaporación media anual de unos 1 800 milímetros, de los cuales próximamente 1 050 para los meses de junio a octubre, ambos inclusive, es decir, cerca del doble para esos meses que el evaporímetro terrestre de Artouste. Las cifras medias apuntadas son todavía superadas con bastante frecuencia y son muchos los años en que la evaporación total pasa de los 2 m.

A cifras análogas se llega cuando se calcula la evaporación en las salinas, partiendo de la producción ordinaria de sal, lo cual podrá parecer extraño, si se tiene en cuenta que se trata ya aquí de superficies considerables y que la tensión del vapor del agua del mar es un poco menos elevado que el del agua dulce; pero se dan allí dos condiciones que no habrá que perder de vista: aunque la superficie es grande, la profundidad de los cuencos es pequeña, y esto permite aprovechar mucho mejor la radiación solar. Por otra parte, la sequedad y la intensidad de los levantes que azotan en verano aquella provincia contribuyen también poderosamente a aumentar la evaporación, convirtiendo el estrago en fuente de riqueza.

Por lo que hace al pantano, algunas mediciones hechas aprovechando las oportunidades, aunque sin carácter de continuidad, me habían hecho presumir que la pérdida no debía ser muy diferente de 1,00 m., sin que los datos recogidos permitieran afinar demasiado esta cifra. Ya es importante, sin embargo, porque si hubiéramos de aplicarla al pantano lleno, representaría la pérdida de la décima parte del embalse.

No se llegará a tanto, porque al vaciarse el pantano la superficie evaporatoria disminuye; pero tampoco hay que contar con que esta disminución sea toda ella efectiva, porque las márgenes que van quedando descubiertas están empapadas de agua, y en ellas la evaporación continúa, aunque en menor proporción y no sin que parte de ese agua vaya lentamente escurriendo hacia el embalse.

Sin tomar en cuenta esta circunstancia que, en definitiva, habría de traducirse por una pérdida constante y proporcional a la superficie descubierta, y

suponiendo además una evaporación uniforme durante el período del vaciado, había llegado D. Elzeario Boix, en sus estudios para el proyecto y construcción de la presa del Villar, a la siguiente fórmula para calcular la evaporación:

$$E = \frac{3}{5} e A \frac{V}{Q} \left[1 - \left(1 - \frac{Q t}{V} \right)^{5/3} \right]$$

en la que E representa la evaporación total durante el tiempo t que dura el vaciado; V , el volumen total del embalse, y A , la superficie cubierta, ambos referidos al momento inicial, y e la evaporación por unidad de tiempo. Para llegar a ella asimilaba el embalse a un cono, hipótesis bastante aceptable en muchos casos (1); pero no es difícil, combinando coeficiente y exponente, adaptarla a otras formas de vaso expresables por una fórmula monomía de la forma $V = a h^n$.

Si en la fórmula de Boix se hace

$$t = \frac{Q}{V} = T;$$

es decir, se supone que el vaciado del pantano es completo, se convertirá en

$$E = \frac{3}{5} e A T,$$

o, lo que es lo mismo, que la pérdida total sería los $\frac{3}{5}$ de la que se produciría durante el mismo tiempo con el embalse completamente lleno. Mas, en general, para el exponente n de la fórmula monomía, la expresión sería

$$E = \frac{n}{2n-1} e A t$$

y si aún se la hubiera de añadir un término, para tomar en cuenta la evaporación de las márgenes,

$$E = A \left(e_1 + \frac{n e T}{2n-1} \right).$$

Todavía con esta fórmula se exageraría un poco la pérdida, porque al tomar para e la evaporación media durante todo el período, se atribuiría a las mayores superficies un coeficiente evaporatorio un poco superior al real, pues, de ordinario, el máximo de la evaporación corresponde casi a la mitad del período de aprovechamiento. No cabría, sin embargo, apurar más el asunto, sin que la aproximación resultara ilusoria, mientras que nuestros conocimientos positivos de los datos del problema sean tan deficientes, como se ha hecho notar.

Urge, pues, emprender observaciones sistemáticas de los distintos factores meteorológicos y topográficos influyentes en el fenómeno, y desde luego no bastarían para su aplicación en España, aunque fueran sus datos más detallados y precisos, los trabajos realizados en este sentido en el extranjero. Numerosos son ya nuestros embalses para que en ellos puedan

estudiarse las condiciones diversas que con más frecuencia se dan en nuestra península, y a ellas debemos dedicar atención preferente. De las consideraciones más atrás expuestas se sigue que los factores que principalmente deben ser objeto de estudio son la temperatura del agua en la superficie y a las distintas profundidades, la temperatura y la humedad del aire, el régimen de vientos y el estado del cielo, anotando, cuando no la radiación solar, de medida siempre delicada, por lo menos la nubosidad media del día.

A estos datos generales vendrían a añadirse los de la evaporación propiamente dicha, en el embalse y en la tierra, cuyas variaciones y mutua relación podrían encontrar interpretación adecuada en aquellos otros factores de los que hemos visto que dependen. Por último, para que los resultados obtenidos pudieran aplicarse con eficacia a situaciones nuevas, debería acompañarles en cada caso una monografía de la estación, en la que se consignara la forma, situación y exposición del embalse, su altitud y, en general, todas aquellas circunstancias que, determinando perfectamente el caso, pudieran sugerir las correcciones que conviniera introducir, al aplicarlo a circunstancias un poco diferentes.

Pero de todos esos factores es la radiación, como ya hemos indicado, la que puede llegar a ser preponderante, marcando un límite a la evaporación de los grandes embalses. De la magnitud de estos límites podremos formar idea por algunas consideraciones de orden general, con las cuales terminaremos este artículo. La cantidad de calor que llega del sol hasta la superficie de la tierra puede apreciarse en unas 13 calorías por minuto y metro cuadrado normal a la radiación. Pocas veces se ha pasado de esta cifra en las observaciones efectuadas en la sierra de Guadarrama por personal del Observatorio Astronómico de Madrid.

Pero el sol sólo luce de día; en el total del año solamente podría ser recibida la mitad de esa radiación. Tampoco el sol pasa por el cenit sino entre los trópicos y sólo dos días en el año; en el transcurso del día la inclinación de los rayos es cada vez mayor cuando se apartan de esta posición única, y es máxima en el horizonte donde ya la radiación se anula. Esta inclinación tiene dos efectos: de una parte, disminuye la cuantía de la radiación a igualdad de superficie; de otra, disminuye también la relación entre la radiación que puede ser absorbida y la que será reflejada. Calcularemos probablemente por exceso si dividimos nuevamente por 2, para determinar la radiación eficaz, que además vendría debilitada también al tener que atravesar mayores espesores atmosféricos. Tendríamos así que el máximo de radiación utilizable en el día medio sería en nuestras latitudes 4 680 calorías, capaces de evaporar, a 15°, 7,85 kilogramos de agua, lo que equivaldría a una capa de 7,85 mm. y supondría en el año 2 865.

Pero por ello sería preciso un cielo completamente limpio de nubes; en Madrid se cuentan aproxima-

(1) Véanse en esta misma REVISTA mis artículos sobre "Cubicación de embalses", 1935, págs. 266, 284 y 297.

damente unos 62 días cubiertos y 173 nubosos; cerca de la mitad de la radiación directa será, pues, interceptada, y a veces bastante más. Hemos supuesto, por último, que toda la radiación absorbida se empleaba en evaporar el agua, pero una parte importante tendrá que emplearse en conservar la temperatura del agua, alimentando su radiación propia. De modo que, habido todo en cuenta, será difícil que en nuestro clima pueda exceder gran cosa la evaporación, en nuestros grandes embalses, del metro en que *grosso modo*, calculábamos la evaporación del Guadalcacín.

Y si hubiéramos de recurrir a ejemplos extranjeros, cosa que, como hemos dicho, sólo ha de hacerse con grandes reservas, podría citarse como comprendido también dentro de estos límites el pantano de Arrowhead (California), con evaporación media de 900 mm. anuales, bien que allí la altitud es de 1 548 metros (1).

Las consideraciones anteriores vienen reforzadas con un dato global. Calculaba Murray en 1887 que la altura media de lluvia anualmente recibida por los continentes ascendía a unos 845 mm.; trabajos más modernos, incluyendo también los mares, parece que elevan esa cifra hasta próximamente un metro. Ahora bien: al cabo del año, la cantidad de lluvia debe casi igualarse con la cantidad evaporada, pues ni la atmósfera ni la tierra pueden almacenar grandes cantidades de agua, y como la casi totalidad de ésta procede del mar, que cubre los 72,5 por 100 de la superficie del globo, resultaría para la evaporación oceánica una altura de 1 380 mm., número bastante concordante con los que hemos encontrado más atrás; y como la mayor parte de esa evaporación tiene lugar en la zona tórrida, y los casquetes polares, donde es mínima, constituyen una pequeña parte de la superficie del planeta, resultará que la cifra máxima de 1 000 mm. asignada a nuestra península no debe apartarse mucho de la realidad.

(1) WILSON: *Irrigation Engineering*. New York, 1910, página 28.

Si se toman sólo en cuenta los meses del verano y principios de otoño, ya que en los restantes la evaporación vendría probablemente compensada con la lluvia recibida directamente en el embalse, y si además se atiende a los resultados de la fórmula de Boix, convenientemente corregida, podría concluirse que, a falta de otros datos más concretos, bastaría con prever una pérdida representada por una capa de 0,60 m. extendida sobre la máxima superficie del embalse; es algo menos del doble de lo observado en Artouste.

Esa cifra, sin embargo, es más bien un máximo, que está bastante lejos de los resultados que dan los evaporímetros, en los que se ha llegado, en pleno desierto, a apreciar pérdidas hasta de más de 4 metros al año; más del doble de la evaporación efectiva de los mares tropicales.

¿Quiere esto decir que habrá que desentenderse en absoluto de los datos de los Observatorios? Sería también una actitud demasiado radical. Ninguna observación es inútil, y el número de las acumuladas en esta materia es considerable: su valor absoluto es, como hemos visto, muy escaso, pero pueden servir de base para comparaciones del mayor interés; aunque su manejo requiere una gran circunspección y un conocimiento profundo de la materia para que las comparaciones sean congruentes.

En este sentido, son muy de apreciar trabajos como el publicado en esta REVISTA hace ya algunos años por nuestro inteligente compañero D. César Villalba, que presentaba en él un bosquejo de la repartición geográfica de la evaporación en la península (1). La ampliación de aquel trabajo, utilizando los datos más recientes, sería todavía de interés, sobre todo si se acompañaba de una labor crítica que condujera a la explicación de ciertas anomalías o que, poniéndolas de relieve, contribuyera a orientar las investigaciones futuras.

(1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1.º de noviembre de 1927. "Las pérdidas por evaporación en España", págs. 408 a 413.