

Corrección del balance hídrico en el Lago de Chapala mediante el uso del antitránsito

Aguilar Garduño Ernesto, Suárez Medina María de los Ángeles
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México
eaquilar@tlaloc.imta.mx, msuarez@tlaloc.imta.mx

Resumen

Desde hace muchos años, se tiene la necesidad de conocer mejor el volumen de agua disponible en el lago de Chapala. Las ecuaciones de balance utilizadas en la “NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales” tiene como fin estimar el valor verdadero del escurrimiento virgen de cada cuenca. Las variables en los registros de régimen de almacenamiento para el vaso del Lago de Chapala impiden realizar el balance completo, los “escurrimientos no medidos” que son una aproximación del error en las mediciones, han llegado a acumular volúmenes de más de 1,000 millones de metros cúbicos en un año. Lo anterior motivó a realizar un estudio detallado de las variables de balance asociadas con el vaso en los registros de régimen de almacenamiento, precisamente el objetivo de este trabajo es plantear la metodología para que dicho error se reduzca al mínimo. El balance del recurso hídrico en el lago de Chapala, se ha estudiado desde hace mucho tiempo debido a los bajos niveles registrados en el vaso en la década de los años cincuenta, se han encontrado errores en la estimación de la evaporación por el coeficiente de evaporación usado, dicha corrección no se descarta, pero tampoco completa la necesidad de corrección en las variables estudiadas. Los resultados obtenidos en este trabajo utilizando el antitránsito de avenidas en vasos exhiben claramente que las correcciones en las variables de salida (la evaporación entre ellas) no han sido suficientes debido a que las variables de entrada introducen un mayor error.

Balance hídrico y antitránsito en vasos de almacenamiento

Para el cálculo del balance hídrico y el antitránsito en vasos de almacenamiento se utiliza la ecuación de continuidad,

$$\frac{dV}{dt} = I - O \quad \text{Ec 1}$$

La ecuación de continuidad muestra que la variación del volumen de almacenamiento (dV , L^3) en el tiempo (dt , T) es equivalente al gasto de entrada (I , L^3T^{-1}) menos el gasto de salida (O , L^3T^{-1}). Como ya se mencionó, esta es la expresión utilizada para realizar el balance hídrico en vasos de almacenamiento en complemento con una relación elevaciones-áreas-capacidades y una ley de gastos de salida del vaso.

En el cálculo de tránsito de avenidas en vasos, se desconoce el gasto de salida (O), que se estima despejándolo de la ecuación de continuidad, en complemento con una relación de almacenamiento y una ley de descargas en el vaso (no es tema a desarrollar en este manuscrito).

$$O = I - \frac{dV}{dt}$$

No es extraño que la ecuación de antitránsito este fundamentada en la misma ecuación de continuidad, a final de cuentas, el antitránsito es un tránsito inverso en el que a partir del gasto de salida (O) y la variación del volumen (dV) en el tiempo (dt), se estiman las entradas (I) al vaso, pero en la forma siguiente:

$$I = \frac{dV}{dt} + O \quad \text{Ec 2}$$

Se ha demostrado que la solución numérica tradicionalmente usada en la ecuación de antitránsito exhibe oscilaciones espurias (Aldama y Aguilar, 1997), posteriormente se encontró que un filtrado del error en los volúmenes registrados mejora notablemente la estimación de los gastos de entrada (Aldama y Aguilar, 2007).

¿Por qué utilizar el antitránsito en la corrección del balance hídrico? Los registros de régimen de almacenamiento incluyen una variable al final del formato de registro, esa variable es un cierre de balance que aplica la ecuación de continuidad, como ya se dijo, es una estimación del error en las variables registradas de entrada, de salida y de almacenamiento, la hipótesis principal de este trabajo, es que el mayor error cometido está en la estimación de las entradas. La propuesta correspondiente es corregir las entradas a partir de una estimación realizada con el antitránsito de avenidas en vasos.

Recordando que el balance hídrico utiliza la ecuación de continuidad, la relación entre las metodologías de balance y antitránsito se observa en las ecuaciones 1 y 2, pero se muestra con mayor detalle en el análisis siguiente.

Variables registradas en los registros de régimen de almacenamiento

Los registros de régimen de almacenamiento para los vasos o cuerpos de agua administrados por la Conagua, se dividen en cuatro partes:

6				
7	COEFICIENTE DE EVAPORACION			0.71
8		METEOROLOGIA		
9	DIA	LLUVIA	EVAP.	N
10		(milímetros)		(m)
251	28-ago-94	0.00	4.96	
252	29-ago-94	0.00	4.76	
253	30-ago-94	0.00	4.49	
254	31-ago-94	0.70	4.21	
255	01-sep-94	64.50	3.98	

Tabla 1 Variables meteorológicas del registro de régimen de almacenamiento

La primera parte de los registros de régimen de almacenamiento (tabla 1) corresponde a los datos hidrometeorológicos, ahí es donde se asientan los registros de lluvia y de evaporación para el vaso, dichos registros son mediciones acotadas en milímetros.

En la segunda parte (tabla 2), se registran las variables del vaso, en la primer columna del vaso se asientan los registros del nivel de agua (son las mediciones que se realizan en el vaso y generalmente están acotadas en metros sobre una cota arbitraria o sobre el nivel medio del mar), con base en cada nivel o elevación, se consulta el área y el volumen correspondientes de acuerdo con una curva elevaciones-áreas-capacidades del vaso que son los dos siguientes registros para el vaso, posteriormente de acuerdo con la evolución del almacenamiento registrado se estima una variación de volumen para cada intervalo de tiempo (último registro del vaso).

REGISTRO DE REGIMEN DE ALMACENAMIENTO				
0.77		VASO CHAPALA		M
EVAP.	NIV. AGUA	AREA	ALMTO.	VAR. ALMTO.
(mm)	(metros)	(has.)	(miles de m3)	
4.96	94.85	107,200.80	4,591,152.30	10,668.58
4.76	94.85	107,200.80	4,591,152.30	0.00
4.49	94.85	107,200.80	4,591,152.30	0.00
4.21	94.85	107,200.80	4,591,152.30	0.00
3.96	94.86	107,252.28	4,601,820.88	10,668.58

Tabla 2 Variables del vaso en el registro de régimen de almacenamiento

La tercera parte del registro de régimen de almacenamiento (tabla 3) incluye los registros de las entradas al vaso. En general las entradas se acotan en unidades de volumen, hay diversas entradas, pero el registro incluye solo dos fuentes de ingreso al vaso de Chapala, una por lluvia directa dentro del vaso calculado con los datos correspondientes de lámina de lluvia vistos en la tabla 1 y el área del vaso de la tabla 2. El otro tipo de entradas al vaso registradas corresponde a los escurrimientos aforados en las corrientes que confluyen al cuerpo de agua. Una entrada más que debería estar registrada como ingreso al lago de Chapala, es la entrada por cuenca propia, podría ser estimada y registrada como la aportación por cuenca propia que drena directamente al cuerpo de agua.

REGISTRO DE REGIMEN DE ALMACENAMIENTO						
ALA	MES ENERO			AÑO 1994		
VAR. ALMTO.	LLUVIA	YUREC. LERMA	DUERO	ZULA	TOTAL	A
(miles de m3)	(miles de m3)					
2.30	10,668.58	0.00	605.830	2,103.060	0.000	2,708.89
2.30	0.00	0.00	599.180	2,299.360	0.000	2,898.54
2.30	0.00	0.00	589.680	2,052.780	0.000	2,642.46
2.30	0.00	750.41	208.390	2,119.820	0.000	3,078.62
0.88	10,668.58	69,177.72	584.580	1,811.290	0.000	71,673.59

Tabla 3 Variables de entrada al vaso en el registro de régimen de almacenamiento

Esa última variable de entrada que no está registrada, justifica la existencia de las entradas no medidas menos las salidas no medidas, es precisamente una entrada no medida.

El cuarto grupo de datos del registro de régimen de almacenamiento (tabla 4), son las salidas, al igual que las entradas, se acotan en unidades de volumen, en estos datos se debe cuidar la estimación del volumen de evaporación, ya que es la variable que registra el mayor volumen en las salidas, al igual que para la lluvia, se estima a partir de la lámina de evaporación correspondiente en la tabla 1 y el área del vaso de la tabla 2, todo multiplicado por un coeficiente de evaporación.

La asignación del coeficiente de evaporación, es precisamente otro error cometido históricamente al utilizar un valor de 0.77 constante a lo largo del año, en los intentos por corregirlo, se ha estimado que el coeficiente de evaporación pudiera tomar valores incluso mayores a la unidad durante algunos meses del año para el caso de cuerpos de agua someros, es decir con relativamente poca profundidad como es el caso del vaso del lago de Chapala, por lo que es necesario contar con valores propuestos para el coeficiente de evaporación en trabajos actuales para no introducir una salida no medida que tenga que ser cuantificada en la última columna del registro.

MUNICIPIO: RIOS LERMA Y DUERO								
CORRIENTE: CHAPALA								
SALIDAS								
TOTAL	ACUEDUCTO	ATEQUIZA	CORONA	ZAPOTLANEJO	DERRAMES	EVAP.	TOTAL	ENM-SNM
(miles de m3)								
2,708.89	512,510	125,450	31,280	0,000	0,000	4,090.89	4,780.13	12,719.82
2,898.64	513,840	125,280	31,100	0,000	0,000	3,925.69	4,695.91	1,697.37
2,642.46	514,060	124,330	31,190	0,000	0,000	3,705.47	4,375.06	1,732.59
3,078.62	516,030	120,610	31,540	0,000	0,000	3,474.04	4,142.22	1,063.60
71,673.59	517,610	121,220	31,710	0,000	0,000	3,284.74	3,955.28	-56,949.73

Tabla 4 Variables de salida del vaso en el registro de régimen de almacenamiento

Al final de estos cuatro conjuntos de datos, hay una columna denominada ENM-SNM (última columna de la tabla 4) también conocida como “*entradas no medidas menos salidas no medidas*”. La expresión matemática para determinarla es una variante de la ecuación de continuidad, que se explica haciendo las hipótesis siguientes;

De la ecuación 1, la variación del volumen se integra en el tiempo, además de las entradas y salidas totales se puede pensar que hay dos componentes, las que son medidas y las que son imposibles de medir, ya sea porque no se miden o que representan un error en las mediciones (ecuación 3):

$$\frac{dV}{dt} = I - O \Rightarrow \Delta V \equiv (Em + Enm) - (Sm + Snm) \quad \text{Ec 3}$$

Que se simplifica en la parte derecha de la ecuación 4, entendiendo que la variación de volumen puede tener dos componentes, una que depende de las variables medidas que son las que están registradas y otra correspondiente a las variables no medidas que se necesitan para el cierre de balance:

$$\Delta V = (Em + Enm) - (Sm + Snm) \Rightarrow \Delta V = (Em - Sm) + (Enm - Snm) \quad \text{Ec 4}$$

Despejando finalmente la variable de interés, se llega a la “*variación de volumen no medida*” o “*entradas no medidas menos salidas no medidas*” o “*Enm - Snm*”, ecuación 5, cabe aclarar que si las entradas medidas y las salidas medidas totalizan las entradas y salidas del vaso, entonces la diferencia de entradas no medidas menos salidas no medidas, sería igual a cero:

$$Enm - Snm = (Em - Sm) + \Delta V \quad \text{Ec 5}$$

Recordemos nuevamente que las variables al lado derecho de la ecuación 5, son las variables medidas; la variación del volumen en el vaso (ΔV) de la tabla 2, las entradas totales (Em) de la tabla 3 y las salidas totales (Sm) de la tabla 4, descritas en las segunda, tercera y cuarta parte del registro de régimen de almacenamiento. El lado izquierdo de la última expresión, corresponde al error cometido al no cuantificar el total de las entradas y salidas o cuantificarlas mal. El objetivo de este trabajo es precisamente plantear la metodología para que dicho error se reduzca al mínimo.

Aplicación del modelo de Antitránsito de avenidas en el lago de Chapala.

El antitránsito, como su nombre lo indica, es el proceso inverso mediante el cual, a partir de la evolución de volúmenes y los gastos de salida, se hace una estimación de los

gastos de entrada. En el lago de Chapala ya existen registros de gastos de entrada y gastos de salida así como la evolución de volúmenes, pero la variable al final del registro de régimen de almacenamiento es una medida del error en las entradas, en las salidas o en ambas, incluso se puede afirmar que puede también incluye errores en la variación de volúmenes.

Haciendo un análisis grueso en cada una de esas tres variables (entradas, salidas y variación de volumen), se puede definir cuál es la que tiene mayor fuente de error para saber dónde se podría trabajar para reducirlo.

La variación de volumen mostrada en la tabla 2, es la variable más confiable de las tres, aunque hay errores de un intervalo de tiempo a otro, se tiene una muy buena aproximación de la realidad física de la variación del volumen registrado, ya que los niveles medidos pueden tener un margen de error muy bajo en la integración de esta variable en un ciclo anual. Además, durante el proceso de antitránsito modificado de avenidas en vasos, se hace un ajuste de dicha variable y se reduce el error para cada intervalo de tiempo en los registros.

Las salidas del vaso mostradas en la tabla 4 en general pueden tener un menor orden de magnitud del error, son variables que se miden en condiciones controladas o se estiman a partir de la evaporación medida en un aparato que tiene muy poco margen de error cuyos datos son registrados en la tabla 1. Los caudales de salida por obra de toma o por los canales de extracción de agua, también tienen poco margen de error, porque la operación del sistema se realiza mediante condiciones controladas. Las salidas podrían tener un mayor margen de error en aquellos casos de desbordamiento, para los cuales, la estimación de la salida por derrames es un poco menos precisa.

Las entradas al vaso cuyo registro se muestra en la tabla 3, son la que tienen una mayor magnitud del error en su cuantificación, por un lado, en el aforo de grandes avenidas, las estaciones hidrométricas dejan de operar, y los caudales máximos son estimados mediante métodos indirectos para el pico de la avenida y en general, los hidrogramas completos son estimados con métodos indirectos que generalmente son más imprecisos que los aforos. Por otro lado, en la estimación del volumen de lluvia de ingreso al vaso, se puede asegurar que existe un error considerable, ya que la lámina de lluvia para todo el vaso es estimada muchas veces con una sola estación climatológica, conviene recordar que la extensión del Lago de Chapala es de más de mil kilómetros cuadrados, y un error de diez milímetros puede derivar en errores equivalentes desde 7 hasta 11 millones de metros cúbicos, de acuerdo con el nivel en el lago, desafortunadamente, el error en ocasiones es mayor a esos diez milímetros de lámina de lluvia en 24 horas.

Se conocen las características geométricas del vaso utilizadas en la curva Elevaciones-Volúmenes-Áreas, además, teniendo un registro de la evolución de los niveles en el vaso, se puede calcular el volumen almacenado y el área de inundación correspondiente. El volumen almacenado se utiliza directamente en la ecuación de balance, y el área del vaso se utiliza para calcular los volúmenes de entrada por lluvia y salida por evaporación directa en el vaso.

La ecuación de tránsito inverso o antitránsito en vasos discretizada con el método de diferencias centrales (Aldama y Aguilar, 1997) y que resuelve la ec. 2, es:

$$I_{j+1} = O_{j+1} + \frac{V_{j+2} - V_j}{2\Delta t}$$

Ec 6

El método de antitránsito modificado propuesto por (Aguilar, 2005), propone filtrar los errores en la evolución de volúmenes, dicho filtrado se realiza mediante cinco pasos de promedios móviles de tres valores contiguos, para filtrar los volúmenes de almacenamiento que se emplean al resolver la ecuación de continuidad en forma inversa. En la tabla siguiente realizada sobre los datos mostrados en la tabla 2 se aprecia dicha corrección.

ROMEDIO(F28:F30)										
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
COMISION NACIONAL DEL AGUA										
GERENCIA REGIONAL LERMA-SANTIAGO										
SUBGERENCIA TECNICA										
REGISTRO DE REGIMEN DE ALMACENAMIENTO										
VASO										
NIV. AGUA	AREA	ALMTO.	Almacenam1	Almacenam2	Almacenam3	Almacenam4	Almacenam5	Var. Almto Cor	VAR. ALMTO.	
(metros)	(has.)		(miles de m ³)							
95.47	110.263.780	5.264.378.700	5.268.018.400	5.266.805.167	5.266.805.167	5.266.670.363	5.266.625.428	-4.358.653	-10.919.100	
95.47	110.263.780	5.264.378.700	5.260.739.000	5.261.952.233	5.261.952.233	5.262.087.037	5.262.131.972	-4.493.457	0.000	
95.46	110.215.040	5.253.459.600	5.257.099.300	5.257.099.300	5.257.503.711	5.257.638.515	5.257.773.319	-4.358.653	-10.919.100	
95.46	110.215.040	5.253.459.600	5.253.459.600	5.253.459.600	5.253.459.600	5.253.594.404	5.253.684.273	-4.089.046	0.000	
95.46	110.215.040	5.253.459.600	=PROMEDIO(F28:F30)		5.249.819.900	5.249.819.900	5.249.864.835	-3.819.438	0.000	
95.45	110.166.300	5.242.540.500	5.246.180.200	5.246.180.200	5.246.180.200	5.246.180.200	5.246.180.200	-3.684.635	-10.919.100	
95.45	110.166.300	5.242.540.500	5.242.540.500	5.242.540.500	5.242.540.500	5.242.540.500	5.242.540.500	-3.639.700	0.000	
95.45	110.166.300	5.242.540.500	5.238.900.800	5.238.900.800	5.238.900.800	5.238.900.800	5.238.900.800	-3.639.700	0.000	
95.44	110.117.560	5.231.621.400	5.235.261.100	5.235.261.100	5.235.261.100	5.235.261.100	5.235.216.165	-3.684.635	-10.919.100	
95.44	110.117.560	5.231.621.400	5.231.621.400	5.231.621.400	5.231.621.400	5.231.486.596	5.231.396.727	-3.819.438	0.000	
95.43	110.117.560	5.231.621.400	5.227.981.700	5.227.981.700	5.227.577.289	5.227.442.485	5.227.262.747	-4.133.980	0.000	
95.43	110.068.820	5.220.702.300	5.224.342.000	5.223.128.767	5.223.128.767	5.222.859.159	5.222.724.356	-4.538.391	-10.919.100	
95.43	110.068.820	5.220.702.300	5.217.082.600	5.218.275.833	5.217.871.422	5.217.871.422	5.217.781.553	-4.942.802	0.000	
95.42	110.020.080	5.209.783.200	5.213.422.900	5.212.209.667	5.212.614.078	5.212.614.078	5.212.703.947	-5.077.606	-10.919.100	

Tabla 5 Variables del vaso con corrección del registro de volumen de almacenamiento

Al contrastar la tabla 2 y la tabla 5, se observa que se insertaron las columnas G a L, en las columnas G a K se muestran los cinco pasos de promedios móviles, la operación se exhibe en la celda señalada en la columna G, donde el valor del almacenamiento se sustituye por el promedio señalado, esto se repite en las columnas H a K, al final de estos promedios móviles, se muestra la modificación del registro de almacenamiento, para hacer más evidente dicha corrección, solo basta observar las columnas L y M, en la columna M se muestra el registro original de la variación del almacenamiento, mientras que en la columna L se observa la variación del almacenamiento corregida, es claro que no puede haber una variación de cerca de once millones de metros cúbicos para un registro diario y en el paso siguiente o día siguiente una variación de cero, para posteriormente volver a tener otro brinco nuevamente de casi 11 hm³, por lo que se justifica plenamente la corrección de la variación del almacenamiento mostrada en la columna L de la tabla 5.

Una vez filtrados los errores en la serie de tiempo correspondiente, se procede a la aplicación de la ecuación de antitránsito de avenidas en vasos (Ec. 6), cabe hacer hincapié que este proceso de modificación del antitránsito, exhibe claramente la corrección de los registros de volumen, el cual por sí mismo, es una fuente importante de error en el balance y genera grandes errores en la estimación de las $Enm - Snm$ (Ec. 5).

COMISION NACIONAL DEL AGUA GERENCIA REGIONAL LERMA-SANTIAGO SUBGERENCIA TECNICA REGISTRO DE REGIMEN DE ALMACENAMIENTO											
VASO				ENTRADAS					SALIDAS		
Almacenam	Var. Almto Cor	VAR. ALMTO.	LLUVIA	TUREC. LERM	DUERO	ZULA	TOTAL	Ent Total Correg	Diferencias	TOTAL	
(miles de m3)				(miles de m3)							
5,266,625,428	-4,358,653	-10,919,100	0,000	8,210	25,920	0,000	34,130	1,530,100	-1,496,060	5,956,245	
5,262,131,972	-4,493,457	0,000	0,000	7,860	25,920	0,000	33,780	1,517,567	-1,483,787	5,943,622	
5,257,773,319	-4,358,653	-10,919,100	0,000	8,040	25,920	0,000	33,960	1,922,379	-1,888,769	5,875,356	
5,253,684,273	-4,009,046	0,000	0,000	7,690	25,920	0,000	33,610	2,059,084	-2,025,044	5,876,621	
5,249,864,835	-3,819,438	0,000	0,000	8,120	25,920	0,000	34,040	2,128,653	-2,094,783	5,879,821	
5,246,180,200	-3,604,835	-10,919,100	0,000	7,950	25,920	0,000	33,870	2,963,317	-2,929,617	6,003,017	
5,242,540,500	-3,639,700	0,000	0,000	7,780	25,920	0,000	33,700	2,310,582	-2,277,072	5,972,760	
5,238,900,800	-3,639,700	0,000	0,000	7,600	25,920	0,000	33,520	2,139,214	-2,105,774	5,891,251	
5,235,216,165	-3,604,835	-10,919,100	0,000	7,520	25,920	0,000	33,440	2,269,543	-2,235,783	6,246,253	
5,231,396,727	-3,819,438	0,000	0,000	7,860	25,920	0,000	33,780	2,108,833	-2,075,223	6,445,019	
5,227,262,747	-4,133,980	0,000	0,000	7,690	25,920	0,000	33,610	1,809,637	-1,835,677	6,610,234	
5,222,724,356	-4,538,391	-10,919,100	0,000	8,040	25,920	0,000	33,960	1,612,517	-1,578,647	6,822,721	
5,217,781,553	-4,842,802	0,000	0,000	7,950	25,920	0,000	33,870	1,161,962	-1,128,262	6,172,166	
5,212,703,947	-5,077,606	-10,919,100	0,000	7,780	25,920	0,000	33,700				

Tabla 6 Estimación de entradas totales con antitránsito de avenidas en vasos

En la tabla 6, se muestra la aplicación de la ecuación (6) en la columna S, se comparan los resultados del antitránsito con los datos originales de la columna R, evidente la diferencia de ambos valores presentada en la columna T, en esta fracción de la tabla, se muestran a primera instancia las bondades de la corrección de la serie de tiempo de volúmenes de almacenamiento, pero en datos puntuales en donde la lluvia toma un papel relevante, se observa que la entrada por lluvia introduce errores de gran magnitud, esto es debido a la gran extensión del vaso y la estimación de la precipitación promedio en muchos casos con una sola estación. En esos días lluviosos, también toman un papel relevante las entradas por ríos, ya que el escurrimiento es mucho mayor y en grandes avenidas deja de aforarse y se estiman indirectamente los máximos caudales registrados.

COMISION NACIONAL DEL AGUA GERENCIA REGIONAL LERMA-SANTIAGO SUBGERENCIA TECNICA REGISTRO DE REGIMEN DE ALMACENAMIENTO													
METEOROLOGIA				ENTRADAS			SALIDAS						
DIA	LLUVIA	Var. Almto Cor	VAR. ALMTO.	LLUVIA	TUREC. LERM	DUERO	TOTAL	Ent Total Correg	Diferencias	TOTAL			
(milímetros)				(miles de m3)									
005	15-jun-96	1.00	-770.572	0.000	997.742	6.390	497.840	1.501.972	0.193.320	-4.601.350	5.865.509	4.363.537	-1.106.391
006	16-jun-96	38.70	1.434.211	0.000	38.010.367	6.480	177.810	38.794.847	8.885.640	31.126.108	5.797.118	-33.997.629	-1.434.211
007	17-jun-96	19.90	4.302.632	0.000	19.855.065	6.650	184.330	20.026.040	11.205.100	8.793.940	5.712.661	-14.313.385	-1.249.812
008	18-jun-96	27.20	6.902.256	9.957.520	27.165.674	5.620	1,147.361	28,318,655	12,933,079	15,385,577	5,598,116	-12,763,020	-532,707
009	19-jun-96	5.50	7.867.670	19.915.040	5,504.015	7.170	1,232.890	6,744.075	12,995.383	-6,251.306	5,455.533	18,626.498	327.830
010	20-jun-96	12.30	7,212.031	9,957.520	12,321.230	16.950	998.650	13,236.730	11,632.589	1,604.141	5,240.107	1,969.897	919.548
011	21-jun-96	0.00	5,972.933	0.000	0.000	74.740	825.120	899.860	9,919.678	-9,019.718	5,084.237	4,184.377	737.594
012	22-jun-96	0.00	4,097.745	0.000	0.000	65.320	1,253.750	1,319.070	8,740.904	-7,421.834	4,909.513	3,590.443	266.363
013	23-jun-96	0.00	3,565.038	0.000	0.000	68.600	1,203.639	1,271.630	8,450.448	-7,178.815	4,782.475	3,460.945	-122.932
014	24-jun-96	76.60	3,810.903	9,957.520	78,813.949	47.870	918.000	79,779.819	8,758.474	71,021.345	4,860.729	-65,181.570	-281.842
015	25-jun-96	0.00	4,394.587	0.000	0.000	28.680	999.650	1,028.330	9,165.040	-8,136.710	4,575.996	3,547.236	-204.887
016	26-jun-96	0.00	4,794.381	9,957.520	0.000	27.990	920.420	948.410	9,451.929	-8,501.519	4,493.658	13,502.768	-163.910
017	27-jun-96	1.50	5,122.191	0.000	1,506.577	221.790	852.600	2,579.967	9,640.625	-7,069.558	4,404.411	1,824.444	-122.932
018	28-jun-96	13.10	5,368.046	9,957.520	13,161.753	263.350	728.800	14,151.903	9,788.300	-4,363.603	4,317.011	123.428	-102.444
019	29-jun-96	0.00	5,572.933	0.000	0.000	205.540	690.250	895.790	9,884.192	-8,862.402	4,193.703	3,391.913	-102.444
020	30-jun-96	15.20	5,368.046	9,957.520	15,286.792	175.740	704.330	16,166.862	9,394.329	-6,862.536	4,305.566	-1,903.776	-389.296
021	01-jul-96	38.40	4,099.474	9,957.520	38,057.610	82.080	682.990	39,422.580	8,187.188	31,235.393	4,253.983	-25,211.898	655.838
022	02-jul-96	8.20	3,278.195	0.000	8,254.989	70.330	1,311.900	9,637.219	9,920.050	2,717.151	4,318.001	-5,319.219	676.128

Tabla 7 Corrección de Enm-Snm

En la tabla 7 se observan los grandes errores en el balance hídrico del Lago de Chapala representados por el valor ENM-SNM de la columna AB, en esa tabla se están resaltando los días 16 y 24 de junio, así como el día 1 de julio de 1996, en los que se observan días con una precipitación registrada muy alta y una consecuente sobreestimación de la entrada de lluvia en volumen (columna N) incrementando el total de las entradas (columna R), al comparar las entradas corregidas con el antitránsito (columna S) se observa la sobreestimación de las entradas totales y en consecuencia se hace evidente un error que

tendría que ser compensado en la estimación de las *Enm - Snm*. El cálculo de las entradas no medidas menos las salidas no medidas obtenido con la ecuación (5), pero utilizando las variables corregidas disminuye notablemente el error que representa esta variable (columna AC).

Finalmente, en la figura siguiente, se observa una comparación de las *Enm-Snm* (columna AB) y la misma variable, pero corregida (columna AC), numéricamente se observan algunos datos del registro estudiado, el cual abarcó los años 1994 a 1999.

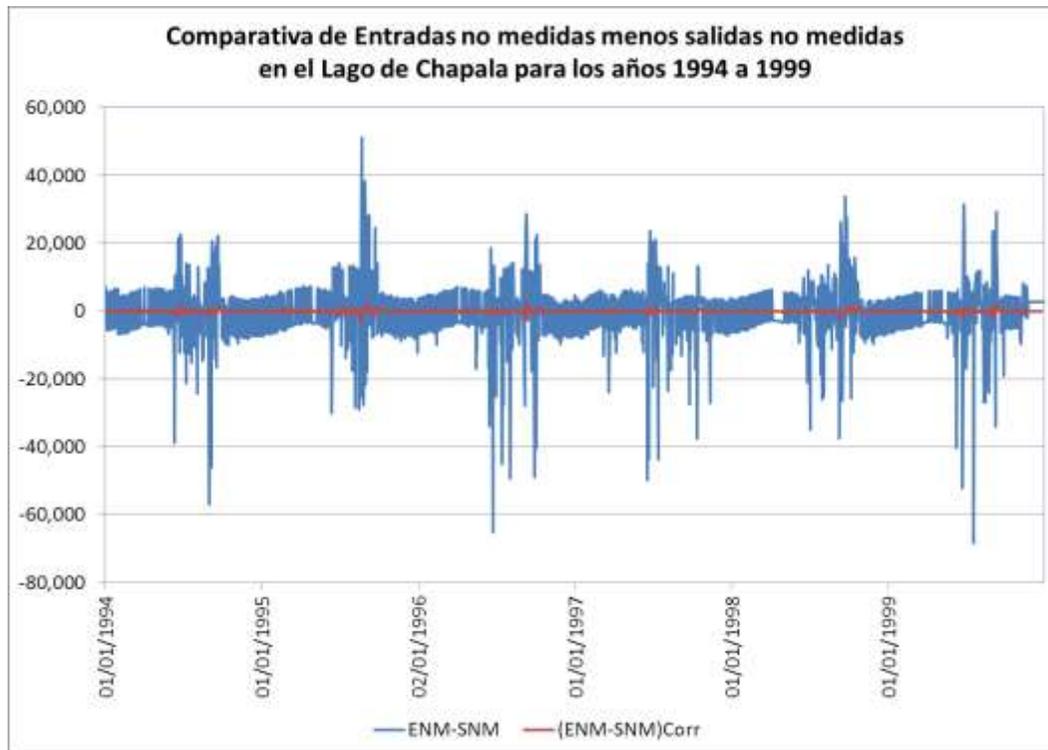


Figura 1 Comparativa de *Enm-Snm* originales y corregidas

El resultado que se observa en la figura anterior, indica claramente que la estimación de las entradas totales al vaso es una parte del problema a resolver, se observa una franja de errores del orden de 10 hm^3 , dicha franja, se resuelve solamente con el filtrado de la serie de tiempo de volúmenes de almacenamiento, lo cual es un indicador claro de que un error de redondeo en dos decimales en la elevación del vaso, introduce errores de la magnitud exhibida.

Conclusiones

En todos los casos donde hay conflictos por la distribución del recurso hídrico es muy valioso tener una certidumbre de la información asociada con el mismo, los registros de régimen de almacenamiento exhiben en la mayoría de los vasos, el grado de incertidumbre de las variables ahí registradas, contar con una metodología que disminuya al mínimo el error repartido entre las entradas y las salidas del vaso sin duda permitirá un mejor manejo en la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

La metodología aquí expuesta no se opone a otros estudios en donde se ha propuesto la corrección de algunas variables en el balance, como lo son por ejemplo, la modificación del coeficiente de evaporación, la incorporación del escurrimiento por cuenca propia que es adicional a las entradas desde los ríos pero que definitivamente es una variable que tendría que aparecer en los registros de régimen de almacenamiento. Es claro entonces que para esas metodologías aceptadas, primero habría que aplicarlas y posteriormente realizar lo que aquí se propone para llegar a mejores resultados.

Esta metodología es una guía para identificar las fuentes de error, en los casos en los que la corrección de las entradas totales no puedan alcanzar el mismo valor que las entradas estimadas con el antitránsito modificado, será posible buscar otras fuentes de error, cabe recordar que la estimación de entradas totales con el antitránsito, involucra todas las variables, es decir, en esa corrección hay una influencia de cada una de las salidas, así como de los volúmenes almacenados y los volúmenes de entrada, es por eso que se afirma que esta metodología es una guía para encontrar las fuentes de error, ya que aunque de manera directa se comparan las entradas totales, en los casos en los que la diferencia es muy grande, cualquiera de las variables puede inducir al error estimado y corregido.

Referencias y bibliografía

Aldama, A. y Aguilar, E., *Tránsito Inverso para la Estimación de Avenidas de Ingreso a Vasos*, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XII, 1, 1997, pp. 15-26.

Aldama, A. y E. Aguilar, *Flow Rate Estimation via Inverse Flood Routing and Spectral Error Control*, American Geophysical Union Joint Assembly, Acapulco, Mexico, 2007.

E. Aguilar, *Tránsito inverso modificado para la estimación de avenidas de ingreso en vasos*, Mexico, 2006.

Fantula, S.O. (1988), *Numerical Methods for Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*, Academic Press.

Mickens, R.E. (1987), *Difference Equations*, Van Nostrand Reinhold.

Ponce, V.M. (1989), *Engineering Hydrology-Principles and Practices*, Prentice-Hall.

IMTA (1999), *Estimación de la evaporación del lago de Chapala, Jalisco*, Informe interno.

IMTA (2000), *Análisis de los componentes del balance hidrológico en el Lago de Chapala*, Informe interno.