

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFERO FREATICO EN FILADELFIA - CHACO CENTRAL PARAGUAYO

Eugenio Godoy V.; Daniel Garcia S. & Sandra Fariña L.

DRH / DGR, Casilla de Correo 984 / 273
Filadelfia - Chaco, Paraguay

RESUMEN

Los acuíferos que se presentan en los paleocauces colmatados del Chaco Central poseen aptitudes para la recarga artificial, con ello se mejora la calidad del agua subterránea y se evita las altas pérdidas por evaporación del agua superficial. El acuífero está constituido, predominantemente, por arena fina, el medio no es excesivamente transmisor, la recarga natural y el flujo subterráneo es muy bajo y la calidad del agua subterránea regional es de 20.000 a 30.000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Informaciones desarrolladas indican que técnicamente es factible almacenar agua dulce en los acuíferos freáticos con agua salobre/salada del Chaco Central. Los resultados principales indicaron que: El volumen de agua recargada está condicionada por el área de captación del tajamar, el espesor del limo depositado en el fondo del tajamar, la carga hidráulica y otros factores; Prácticamente lluvias mayores de 20 mm, con una intensidad de 1 mm/min, presentan escorrentía superficial que alimentan a los tajamares; Los acuíferos salobres/saladas después de recargados artificialmente han disminuido sus salinidades a valores menores que 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Se presenta las características geológicas, hidrogeológicas y caso de estudio de recarga artificial de acuífero freático en Filadelfia - Chaco Central Paraguayo.

INTRODUCCION

La ciudad de Filadelfia esta ubicada en el Chaco Central de Paraguay (Fig. 1). Presenta una topografía llana con una altura entre 130 y 140 m sobre el nivel del mar. El clima es semi-árido, con temperaturas medias mensuales de 15°C en invierno y 35°C en verano. La precipitación fluctua entre 500 y 1.200 mm/año (1941-1992). La evapotranspiración potencial alcanza 1.300 mm/año.

La recarga artificial se practica en forma empírica desde hace años en el Chaco Central. Fue practicado por los indígenas del Chaco quienes, en los terrenos bajos arenosos, construían un pozo central rodeado de un anillo de pozos. El agua de lluvia que se acumulaba en el bajo penetraba en los pozos del anillo lo cual hacia que nunca más faltara agua en el pozo central (Sosa, 1976).

Los colonos Mennonitas asentados en el Chaco Central tomaron esta experiencia y lo están practicando extensivamente. En las áreas urbanas se practica en sistema de recarga mediante pozo vertical, infiltrando el agua de lluvia recogida en los techos o agua drenada de los patios y, en algunos casos, con excedentes de aguas de lluvias almacenados en aljibes. Este sistema está dando excelentes resultados, manteniendo el acuífero freático calidades del agua que oscilan entre 200-2.000 $\mu\text{mhos/cm}$, con rendimiento de los pozos de 1- 4 m^3/h .

BALANCE HIDRICO

Dado la ausencia de ríos y arroyos (la región es de tipo arreico), los componentes elementales del ciclo hidrológico se reducen a : precipitación, evapotranspiración e infiltración. Considerando valores medios de precipitación y evapotranspiración, para lapsos extensos, el área se caracteriza por un déficit hídrico en el balance, ello origina un clima de tipo semi-árido. En la Tabla I se reproduce el desarrollo del balance hídrico.

GEOLOGIA

La sección superior del área de Filadelfia corresponde a un ambiente deposicional del Cuaternario, denominado Formación Chaco, caracterizada por el trenzado de corrientes, la deposición de corte y relleno, y las complejidades asociadas con la sedimentación regional reciente, en la que el río Pilcomayo es el principal curso superficial que ha influenciado en la forma y modo de ocurrencia de las aguas subterráneas. A causa de los frecuentes desplazamientos de cauces del río Pilcomayo, causado por el arrastre de materiales y la reducida pendiente, dejó una abundante cantidad de paleocauces rellenos con arena, que es la morfología más resaltante del área de estudio.

Los estudios geológicos identificaron la existencia de tres geomorfologías en el área de Filadelfia : monte, paleocauce antiguo y paleocauce reciente (Fig. 2).

La superficie de la zona de Monte está constituida por una capa de arcilla, o limo arcilloso, marrón claro a pardo rojizo de 13 a 17 m de espesor como máximo. Asociada con la arcilla se presentan mayormente yeso, concreciones de carbonatos y nódulos de óxido de hierro. Debajo de esta capa se presenta arena fina saturada con agua salada.

El Paleocauce Antiguo está formado, superficial y predominantemente, por limo o limo algo arenoso de 2 - 4 m de espesor. El Paleocauce Reciente presenta limo arenoso hasta los 1,2 - 4,0 m de profundidad, en algunos casos este material no aparece, sustituyendolo arena fina limosa con un espesor de 0,5 - 3,0 m. Por debajo de esta cobertura superior, hasta los 18 - 20 m de profundidad, en ambos paleocauces se presentan arena fina cuarzosa, con minerales de biotita y pequeños nódulos ferruginosos, presentando saturación con agua desde los 10 - 8,5 m. En algunos casos se presentan lentes delgadas de arcillas desde los 11 m como media, las cuales son muy importantes porque suelen separar el agua dulce del agua salada. Como base del acuífero freático se presenta una arcilla de 3 a 5 m de espesor (Fig. 3).

AGUA SUBTERRANEA

El único recurso de agua subterránea potable del Chaco Central lo constituyen las lentes o bolsones de agua dulce (<1.000 $\mu\text{mhos/cm}$) a salobre (1.000 - 10.000 $\mu\text{mhos/cm}$) en ambiente de agua salada (>10.000 $\mu\text{mhos/cm}$) que se presentan el acuífero freático, asociadas a lugares con condiciones favorables para la infiltración.

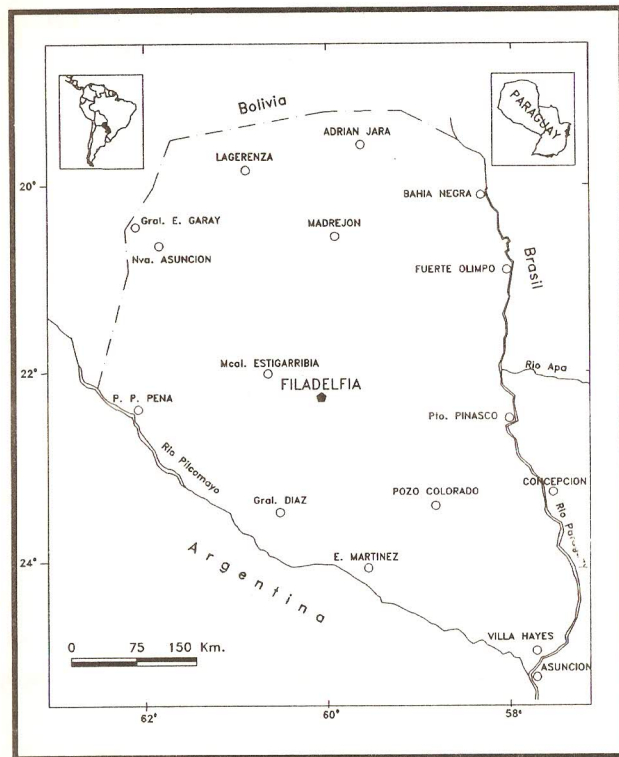


Fig 1. Ubicación de Filadelfia en el Chaco Central Paraguayo

En las áreas rurales se practica el sistema de recarga en superficie mediante tajamar, con fondo permeable, que almacena el agua de la escorrentía superficial para dejarla luego infiltrar lentamente. Este método está dando también óptimos resultados. Los sistemas de recarga artificial mediante tajamares también se practican en las áreas urbanas, cuando se dispone de suficiente espacio para la construcción de los tajamares.

Como en el semi-árido brasilero el problema de agua es condicionante para el desarrollo, las técnicas de recarga artificial que combinados con las técnicas de "barragem subterráneas" pueden ser opciones muy ventajosas.

En este trabajo se presenta las características geológicas, hidrogeológicas y caso de estudio de recarga artificial de acuífero freático en Filadelfia - Chaco Central Paraguayo.

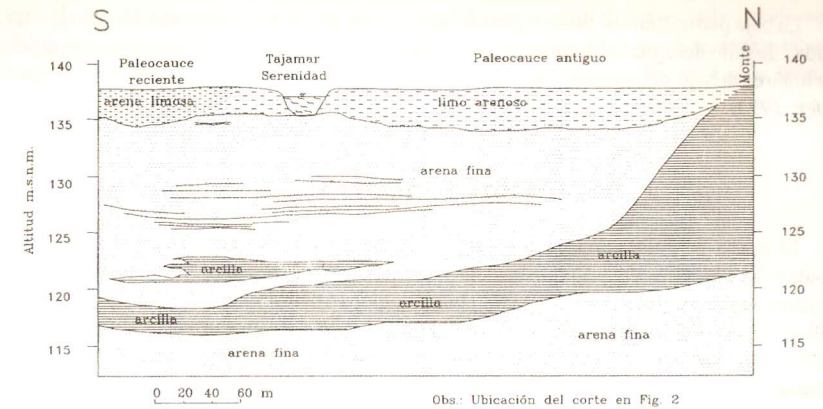
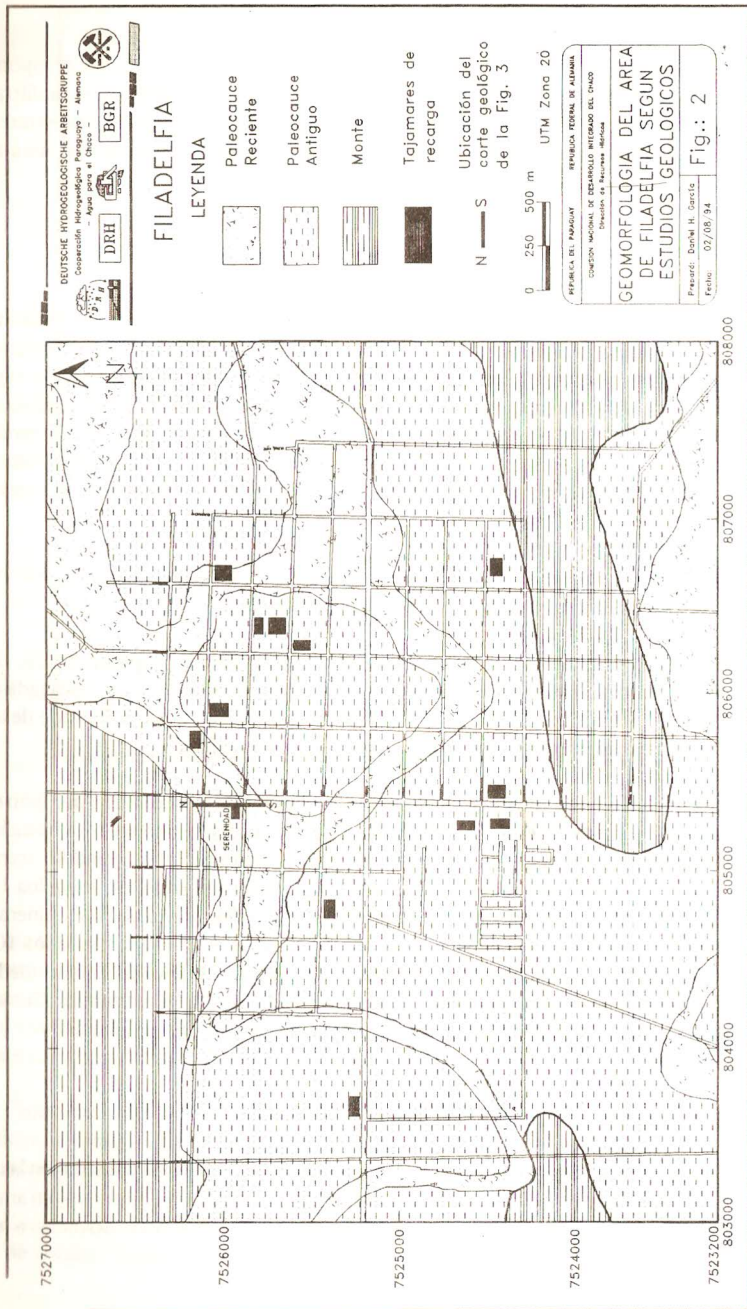


Fig 3 : Corte geológico ilustrando la distribución de las capas litológicas en las diferentes morfologías

Solamente en los paleocauces se presentan aguas subterráneas como acuíferos freáticos, que regionalmente son saladas. Agua dulce se presenta en dimensiones más bien reducidas flotando sobre las aguas saladas y son conservadas en los lugares de ocurrencia ya sea por recarga natural o artificial.

En las zonas de Monte no existen acuíferos freáticos, únicamente se presenta acuífero confinado, con agua salada.

Hidroquímica

La calidad del agua subterránea es muy variable, ya sea horizontal como verticalmente. Presentan una estratificación en la calidad, estando subordinada la presencia de agua dulce en áreas donde existen recarga. Las aguas dulces son predominantemente del tipo bicarbonatada cálcica, en menor grado sódica.

Agua salada se presenta en toda el área y fué condición inicial en las áreas donde ahora se presentan agua dulce. Esta, por el proceso de recarga desplazó al agua salada original formando un bolsón de agua dulce. Las aguas saladas son predominantemente del tipo sulfatada, mayormente sódica y en menor grado cálcica.

Características Hidráulicas

El nivel freático se encuentra a una profundidad media de 10,0 m en el Oeste y de 8,5 m en el Este. El gradiente general de la superficie freática es de aproximadamente 0,03 % hacia el Este. La permeabilidad promedio es de 6 - 8 m/día y la porosidad eficaz de 0,1. La velocidad promedio del flujo subterráneo regional es de 7 m/año.

La baja permeabilidad de las arenas finas de los Paleocauces en combinación con la baja velocidad de flujo del agua subterránea y la recarga continua, mantienen las lentes de agua dulce en los lugares debajo del punto de recarga e impiden la afluencia del agua salada circundante (Bender, 1993).

RECARGA ARTIFICIAL

El grado de infiltración de la precipitación en el subsuelo depende de la cantidad e intensidad de lluvia, la evapotranspiración y escorrentía superficial. Consecuentemente la infiltración está controlado por fenómenos climatológicos e hidrológicos. Según *Smith (1969)*, la infiltración en arenas es un simple proceso hidráulico, sujeto solamente a la modificación por ascenso capilar de la estructura interna de los poros de la arena. Pueden ser desarrollados ecuaciones para la profundidad de penetración de una cantidad dada de precipitación, caída inicialmente sobre la superficie de la arena.

Considerando que h es la distancia requerida para disipar una lámina de agua dentro de la zona no saturada en capacidad de campo Ω . Luego, para una superficie A con precipitación de altura i , el volumen total V de agua requerida para llenar el paquete de la zona no saturada es :

$$V = h * A * \Omega \quad (1)$$

La infiltración disponible es $i * A$, así :

$$V = i * A \quad (2)$$

Reemplazando V en (1) y realizando las eliminaciones se tiene :

$$h = i / \Omega \text{ (para arena seca)} \quad (3)$$

Si el suelo presenta humedad (S) inicial, luego :

$$h = i / (\Omega - S) \quad (4)$$

De acuerdo al balance hídrico para Filadelfia, el excedente anual de lluvia de 31 mm solamente puede infiltrarse hasta los 15 cm de profundidad por debajo de la longitud (80 cm) de las raíces en los paleocauces, usando $\Omega=208$ mm/m para sedimentos marga arenosa fina, de acuerdo a Water Encyclopedia, U.S. Dpto. de Agricultura, en *Bender (1993)*. Este excedente posteriormente es consumido por la evapotranspiración. Por consiguiente, no existe recarga directa de las precipitaciones a través de las áreas arenosas de los paleocauces. Recarga natural se produce en áreas donde existen depresiones y suficiente columna de agua.

Por otro lado, las características geológicas e hidrogeológicas de los paleocauces permiten la práctica de recarga artificial para aumentar el volumen de agua aprovechable para abastecimiento. Actualmente la técnica de recarga artificial está muy difundida, predominantemente mediante tajamares con fondo permeable y tiene por objetivos :

- * Utilizar el acuífero freático como depósito de almacenamiento de los excedentes de aguas superficiales durante el período de intensas lluvias, que de otra manera se desperdiciarían por evaporación y mantener la disponibilidad de agua dulce, para las épocas de sequías;
- * Almacenar agua dulce en acuífero con agua salada;
- * Aumentar la cantidad de agua dulce disponible del acuífero;
- * Disminuir la salinidad del agua del acuífero;
- * Tratamiento del agua por purificación natural en el subsuelo.

Caso de Estudio : Tajamar de Infiltración "Serenidad" - Filadelfia / Chaco

El tajamar se construyó en 1981, comenzando su monitoramiento desde Marzo 1990, con la instalación de 7 pozos de observación con profundidades promedio de 9,5 m alrededor del tajamar de infiltración. Su área de captación es de aproximadamente 6.900 m² y recibe agua de lluvia drenada por los canales laterales de las calles de la ciudad. Como estas calles no están asfaltadas, el agua de escorrentía presenta considerable cantidad de materiales finos, que se depositan en el fondo del tajamar. En 4 años se formó una costra de 17 - 35 cm de material fino (*DACH/DTCD, 1991*). El agua del tajamar presenta aproximadamente conductividad eléctrica de 100 μ hos/cm.

Desde Marzo 1993 fueron instalados nuevos pozos (4) de observación con profundidades de hasta 40 m, uno cerca del tajamar y los otros separados entre sí unos 40 - 60 m sobre una misma línea.

Originalmente todo el área presentaba agua salada. El análisis de datos de conductividades eléctricas (CE) de Julio 1994 por *Bender (1994)*, indican que los pozos alejados del tajamar no están influenciados por la recarga artificial. Ellos presentan la zonación normal de la calidad regional del agua subterránea. En la parte superior se presenta agua con CE de 3.000 μ hos/cm, con poco metros de espesor. Debajo sigue una zona de 4 - 5 m de espesor con incremento de la salinidad en profundidad, con CE entre 3.000 a 10.000 μ hos/cm. El cambio de 10.000 a 20.000 μ hos/cm ocurre rápidamente. Esta zona de transición es solamente de 2 m de espesor. Siguiendo abajo, la salinidad se incrementa lentamente y alcanza CE de casi 30.000 μ hos/cm hasta la base arcillosa del acuífero.

Completamente diferente son las condiciones presentadas en los pozos de observación ubicados en las periferias del tajamar. Aquí, una capa de 7 m de espesor de agua dulce con CE menor que 1.000 μ hos/cm se ha formado, sobreyacendo a agua con CE mayor que 3.000 μ hos/cm. El cambio de 3.000 a 10.000 μ hos/cm ocurre abruptamente, tal como se puede observar en la Fig. 4.

Por otro lado, cerca del tajamar el nivel del agua subterránea es 0,6 m más alto comparado con los niveles de agua en los pozos alejados del tajamar. Según *Bender (1994)*, esto generalmente concuerda con la ley de Ghyben-Herzberg, pero con cerca de 0,5 metro de diferencia de carga se debería tener un espesor de 20 m de agua dulce sobreyacendo al agua salada con densidad próximo a la del mar. La explicación de esta discrepancia descansa posiblemente en la existencia de camadas de arcillas en la base del cuerpo de agua dulce, las

cuales evitarían su extensión en profundidad. Sin embargo, observaciones realizadas en otros tajamares de infiltración indican una distribución del agua dulce mayor horizontal que verticalmente, que se debería a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales, lo que motiva la presencia de agua salobre/salada por debajo del área de influencia del tajamar, que se observa en la Fig. 4.

El volumen de agua infiltrado en un ciclo hidrológico fue estimado por DACH/DTCD (1991) en 3.200 m³, correspondiendo al 120 % del volumen de almacenamiento del tajamar (2.670 m³). Su factor de infiltración es de aproximadamente 1.2. Considerando el período 1990 - 1993, se infiltró 12.800 m³ de agua dulce, que puede abastecer a 100 ganados por 6 años.

CONCLUSIONES

El agua es el más importante factor limitante para el desarrollo económico del Chaco Paraguayo. Las sequías periódicas hacen desaparecer las reservas hídricas superficiales (tajamares, aguadas y aljibes) y la elevada mineralización predominante del agua subterránea impide el uso de ella para consumo humano, agricultura regada o ganadero. El uso del agua subterránea dulce, que se presentan esporádicamente en los acuíferos freáticos, han ayudado a paliar las limitaciones del recurso agua.

Las prácticas de recarga artificial ofrece alternativas viables para la optimización y conservación de los recursos de aguas superficiales y subterráneas.

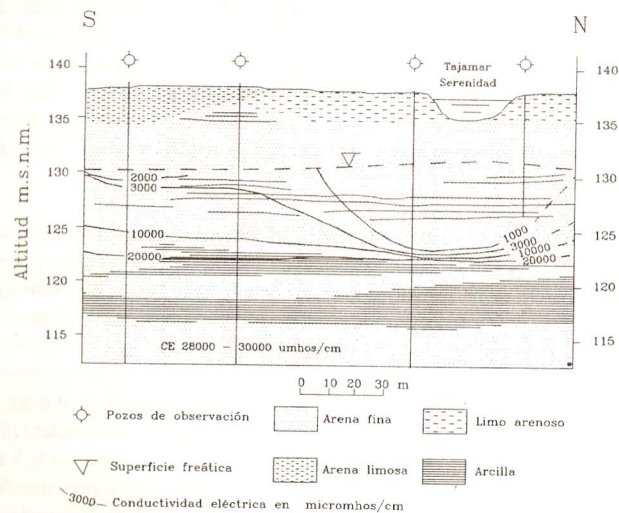


Fig. 4 : Corte hidrogeológico ilustrando la distribución de la salinidad del agua subterránea recargado artificialmente

Las prácticas de recarga artificial indicaron que:

- Es factible la recarga artificial de los acuíferos freáticos del Chaco Central mediante tajamares con fondo permeable, utilizando agua proveniente de las precipitaciones pluviales. Los resultados obtenidos son satisfactorios tanto en el mejoramiento de la calidad del agua subterránea y en el incremento de los recursos del acuífero;
- Con la recarga no se eleva la superficie freática del acuífero, sino que el agua infiltrada al llegar al acuífero forma un domo, que desplaza poco a poco al agua allí existente, extendiéndose lentamente hasta alcanzar su nivel original. Esta expansión del agua es mayor horizontalmente que verticalmente debido a los fenómenos de difusión y diferencias de densidades del agua infiltrada y del acuífero, lo cual determina la estratificación de la calidad del agua;
- Las delgadas lentes de arcillas que aparecen discontinuamente en los estratos permeables no tienen mayores incidencias sobre la recarga;
- El volumen de agua recargado, mediante tajamares, está condicionada por el área eficaz de infiltración, el área de captación, el espesor de limo depositado en el fondo del tajamar (el agua de escorrentía superficial arrastra gran cantidad de materiales en suspensión), la carga hidráulica del tajamar y otros factores;
- Prácticamente lluvias mayores de 20 mm, con intensidad de 1 mm/min, presentan escorrentía superficial que alimenta a los tajamares.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bender, H. (1993). **El Impacto de Recarga Indirecta en Planicies Semi-áridas y Áridas**. Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR), inédito, 68 págs. Filadelfia - Chaco, Paraguay.
- Bender, H. (1994). **One Year of Monitoring Artificial Recharge in Filadelfia. Observations and Considerations**. Cooperación Hidrogeológicas Paraguayo - Alemana (DRH/BGR), inédito, 10 págs. Filadelfia - Chaco, Paraguay.
- DACH / DTCD (1991). **Recarga Artificial de Acuífero Freáticos en el Chaco Central Paraguayo**. Proyecto PAR/88/009. Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco Paraguayo / Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 130 págs. Filadelfia - Chaco, Paraguay.
- Smith, W.O. (1969). **Infiltration in Sands and its Relation to Groundwater Recharge**. Proceedings of the Wageningen Symposium : Water in the Unsaturated Zone. Volume II. IASH/AIHS - Unesco publication, p. 851 - 865. Louvain - Belgium.
- Sosa, H.C. (1976). **Posibilidades de la Recarga de Acuíferos por Infiltración Artificial en el Chaco Paraguayo**. El Desarrollo del Chaco Paraguayo (169 - 174). Separata de "Estudios Paraguayos", Revista de la Universidad Católica. Vol VII, n° 1. 1980, págs. 143 - 258. Asunción - Paraguay.

TABLA I

BALANCE HIDRICO DE FILADELFIA Método Empírico

	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Total
Precipitación (P) mm	13	26	68	88	115	120	110	98	84	44	27	20	813
Evapotranspiración potencial (ETP) mm	109	95	102	104	87	93	80	59	57	64	60	74	984
Variación reserva (@R)	-13	-----	-----	-----	28	27	30	35	-----	-20	-33	-54	
Reserva de agua utilizable (mm)	0	0	0	0	28	55	85	120	120	100	67	13	
Excedentes (EX) mm	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4	27	-----	-----	-----	31
Evapotranspiración real (ETR) mm	26	26	68	88	87	93	80	59	57	64	60	74	782
Déficits	83	69	34	16	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	202

Evaporación (E) en Filadelfia (mm/día)	4,4	4,5	4,7	5,8	4,7	5,0	4,6	2,7	2,7	4,1*	2,5	3,0
Evaporación (E) Mcal. Estigarribia (mm/día)	7,4	8,0	7,4	6,5	6,5	6,2	5,1	4,7	4,3	3,9	4,0	5,5
Coefficiente " f "	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Temperatura (t) °C	23	25	29	30	31	31	29	29	25	22	20	20

ETP = f.d.E (método de Penman)

f = coeficiente reductor correspondiente al mes

d = número de días del mes

E = Evaporación en superficie de agua libre en mm/día
(DACH / DTCD, 1991)

* valor anómalo, se adoptó como valor medio representativo 2.6

Reserva completa de agua utilizable por las plantas = $1.4 \times (0,208 - 0,10) \times 800 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$

1.4 = densidad del suelo

0,208 = capacidad de campo

0,10 = punto de marchitez permanente

800 mm = longitud promedio de las raíces en los paleocauces reciente

@R = Incremento en la reserva de agua utilizable por las plantas en mm

EX = Excedentes de agua (escorrentía + infiltración) en mm

Déficits = ETP - ETR

En esquema, un balance hídrico puede plantearse así : $P = ETR + @R + EX$